



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA Y TÉCNICAS DE
SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA ENTENDER EL PROCESO DE INUNDACIONES EN
ZONAS URBANAS**

PRESENTA

M. Ing. Carlos Ignacio Vizcaíno López

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS

ANTRÓPICOS

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL

Cotutor: Dr. Isaí Gerardo Reyes Cedeño

Asesor: Dra. Lilia Guerrero Martínez

Aguascalientes, Ags., a 27 de mayo de 2025

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

M. EN ING. AMB. MARÍA GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ** con ID **266191** quien realizó la tesis titulada: **ANÁLISIS DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA Y TÉCNICAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA ENTENDER EL PROCESO DE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 07 de mayo de 2025.

Dr. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN
Tutor de tesis

c.c.p.- Carlos Ignacio Vizcaíno López – Alumno del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p.- Dr. José de Jesús López García – Coordinador del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

M. EN ING. AMB. MARÍA GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T E

Por medio del presente como **CO-TUTOR** designado del estudiante **CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ** con ID **266191** quien realizó la tesis titulada: **ANÁLISIS DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA Y TÉCNICAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA ENTENDER EL PROCESO DE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 07 de mayo de 2025.



Dr. ISAÍ GERARDO REYES CEDEÑO
Cotutor de tesis

c.c.p.- Carlos Ignacio Vizcaíno López – Alumno del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p.- Dr. José de Jesús López García – Coordinador del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos

CARTA DE VOTO APROBATORIO
INDIVIDUAL

M. EN ING. AMB. MARÍA GUADALUPE LIRA PERALTA
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ** con ID **266191** quien realizó la tesis titulada: **ANÁLISIS DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN DE AGUA Y TÉCNICAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA ENTENDER EL PROCESO DE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que **él** pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 07 de mayo de 2025.

Lilia Guerrero Mtz.

Dra. LILIA GUERRERO MARTÍNEZ

Asesor de tesis

c.c.p.- Carlos Ignacio Vizcaíno López – Alumno del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos
c.c.p.- Dr. José de Jesús López García – Coordinador del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 04/06/2025

NOMBRE: Carlos Ignacio Vizcaino López ID 266191

PROGRAMA: Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos LGAC (del posgrado): Estudios y Proyectos de Ingeniería Civil

TIPO DE TRABAJO: (x) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: Análisis de sistemas de infiltración de agua y técnicas de simulación numérica para entender el proceso de inundaciones en zonas urbanas

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Generación de una nueva metodología y obtención de datos de entrada para la modelación numérica de inundaciones y sistemas de infiltración de agua

INDICAR	SI	NO	N.A.	(NO APLICA)	SEGÚN	CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>						
SI						El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI						La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI						Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI						Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI						Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI						El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI						Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI						Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI						Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>						
SI						Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI						Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI						Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NA						Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI						Coincide con el título y objetivo registrado
SI						Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI						Tiene el CVU del Conacyt actualizado
SI						Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>						
NA						Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
NA						El estudiante es el primer autor
NA						El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
NA						En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
NA						Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
NA						La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Si ☒ X
No ☐

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. José Ángel Ortiz Lozano

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. J. Jesús López García

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Mario Ernesto Esparza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M. en Ing. Amb. Ma. Guadalupe Lira Peralta

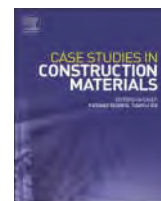
Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico:..... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.



Contents lists available at ScienceDirect

Case Studies in Construction Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cscm

Short communication

Experimental and numerical investigation on clogging by trapped solid particles in permeable porous concrete

Carlos Ignacio Vizcaíno-López^{a,1}, Martín Hernández-Marín^{b,*,2},
 Gil Humberto Ochoa-González^{c,3}, Lilia Guerrero-Martínez^{d,4},
 Isaí Gerardo Reyes-Cedeño^{e,5}, Anuard Isaac Pacheco-Guerrero^{f,6}

^a Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Autonomous University of Aguascalientes, Mexico^b Department of Civil Engineering, Autonomous University of Aguascalientes, Mexico^c Department of Habitat and Urban Development, ITESO Jesuit University of Guadalajara, Mexico^d Department of Civil Engineering, Autonomous University of Aguascalientes, Mexico^e Universidad Panamericana, Facultad de Ingeniería, Jose María Escrivá de Balaguer 101, Villas Bonaterra, Aguascalientes, 20296, México^f Engineering Academic Unit I, Autonomous University of Zacatecas, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Permeable porous concrete
 Pore clogging
 Numerical simulation model
 Permeability
 Seepage velocity

ABSTRACT

Clogging due to entrapment of solid particles in pores is a recurring process that limits the performance of permeable porous concrete (PPC). In this work, an analysis based on the results of laboratory and numerical modelling is presented. The experimental work involved the preparation and testing of PPC cylindric samples (100 mm diameter and 160 mm in height) to obtain the porosity and permeability parameters, and based on these two, the seepage velocity. These three parameters were used as inputs in the further numerical models, which were accomplished with the commercial software COMSOL Multiphysics v.6.2, based on the finite element method. Two scenarios with six simulations (3 each) were performed using three types of materials as solid particles, as well as two dimensional samples with the dimensions of the experimental samples. From the experimental work we found that the porosity and permeability varied from 26 % to 28 % and 1.75–1.96 mm/s, respectively, and from these parameters the calculated seepage velocity varied from 8.28 to 9.61 mm/s. However, for a comparative analysis, a different value of seepage velocity was used in each modelling scenario: the resulting from the experimental work, this is 8.98 mm/s for scenario 1, while for scenario 2, a value of 2.43 mm/s was used, which corresponds to the minimum recommended for the performance of PPC, according to American Concrete Institute ACI 522 R technical report. In the numerical work, we observed that the reduced seepage velocity of scenario 2 permitted the exit of particles from the model in all cases.

* Corresponding author.

E-mail addresses: vizlopcar@hotmail.com (C.I. Vizcaíno-López), martin.hernandez@edu.uaa.mx (M. Hernández-Marín), gilochoa@iteso.mx (G.H. Ochoa-González), lilia.guerrero@edu.uaa.mx (L. Guerrero-Martínez), igreyes@up.edu.mx (I.G. Reyes-Cedeño), anuard.pacheco@uaz.edu.mx (A.I. Pacheco-Guerrero).

¹ 0000-0002-3001-0176² 0000-0002-9420-0403³ 0000-0002-3699-0443⁴ 0000-0002-7769-1335⁵ 0009-0002-4681-1311⁶ 0000-0003-4876-7115<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04810>

Received 18 February 2025; Received in revised form 12 April 2025; Accepted 20 May 2025

Available online 21 May 2025

2214-5095/© 2025 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
Departamento de Desarrollo Académico

Aguascalientes, Ags., **10/marzo/2025**
Asunto: Carta de aceptación.

CARLOS IGNACIO VIZCAÍNO LÓPEZ
AUTOR DE CONTACTO
PRESENTE

Nos complace informarles que el manuscrito ID-B2024-6809CT titulado "Modelos Digitales para el Modelado Numérico de Inundaciones en Zonas Urbanas Obtenidos con Técnicas de Fotogrametría y GIS", ha sido ACEPTADO para su publicación en la revista CONCIENCIA TECNOLÓGICA como artículo de investigación, ya que ha concluido satisfactoriamente el proceso de revisión por parte de la Coordinación Editorial.

Su trabajo será publicado en la edición 68 de la revista, correspondiente al semestre julio-agosto de 2025 con ISSN 1405-5597 con dirección electrónica <https://www.redalyc.org/revista.oa?id=944>.

El Comité Editorial de la revista CONCIENCIA TECNOLÓGICA agradece su participación y le invita a seguir colaborando con sus valiosas aportaciones.

Quedamos a sus órdenes para cualquier duda o información adicional que requiera.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®

MARCELA RODRÍGUEZ GONZÁLEZ
COORDINADORA EDITORIAL DE CONCIENCIA TECNOLÓGICA

ccp. Archivo

MRG*



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 138
e-mail: desacad@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



Instituto Tecnológico®
de Aguascalientes



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por el apoyo económico recibido para llevar a cabo esta investigación. En lo personal quiero agradecer al Dr. Martín Hernández Marín, así como a los integrantes de mi comité tutorial.



DEDICATORIA

A Karla, Alicia, Diana, Yareli y Alisson



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL1

ÍNDICE DE TABLAS3

ÍNDICE DE FIGURAS5

SIGLAS Y ACRÓNIMOS8

RESUMEN 10

ABSTRACT..... 11

CAPÍTULO I: Planteamiento del Problema 12

CAPÍTULO II: Estado del Arte..... 18

CAPÍTULO III: Marco Teórico..... 20

 3.1 Modelado y Simulación Numérica de Inundaciones 20

 3.2 Calibración, validación y verificación de un modelo de inundaciones 21

 3.3 Etapas clave para el desarrollo de un modelo de inundaciones 21

 3.4 Enfoques para el modelado hidráulico de inundaciones 22

 3.5 Modelado hidrológico del proceso Lluvia-Escorrentía 27

 3.6 Enfoques para el modelado hidrológico de Lluvia-Escorrentía 28

 3.6.1 Modelos de Eventos y de simulación continua 28

 3.6.2 Modelos empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos..... 29

 3.6.3 Modelos agrupados, semidistribuidos y distribuidos..... 31

CAPÍTULO IV: Marco Metodológico 33

 4.1 Área de Estudio..... 33

 4.2 Obtención de datos para la modelación de sistemas de infiltración 37

 4.2.1 Permeabilidad y Porosidad..... 37

 4.3 Modelación de sistemas de infiltración..... 40

 4.4 Obtención de datos para la modelación hidrológica..... 45

 4.4.1 Datos hidrológicos..... 45

 4.4.2 Uso de suelo 46

 4.4.3 Permeabilidad del suelo 48

 4.4.4 Datos de precipitación..... 52

 4.4.5 Análisis de frecuencias de lluvias máximas 53

 4.4.6 Datos de Intensidad-Duración-Frecuencia de lluvias máximas..... 58

4.4.7 Hietogramas	60
4.5 Modelación hidrológica	61
4.5.1 Conversión de lluvia a escorrentía	62
4.5.2 Conversión de escorrentía a caudal puntual.....	64
4.5.3 Proceso de enrutamiento.....	65
4.6 Obtención de datos para la modelación hidráulica.....	66
4.6.1 Datos topográficos y de cobertura de suelo	66
4.6.2 Transporte de Sedimentos	77
4.7 Modelación hidráulica	78
CAPÍTULO V: Resultados	81
5.1 Modelación de sistemas de infiltración.....	81
5.1.1 Porosidad y Permeabilidad.....	81
5.2 Modelación hidrológica	82
5.2.1 Uso de Suelo.....	83
5.2.2 Permeabilidad del suelo	84
5.2.3 Análisis de Frecuencias.....	85
5.2.4 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia	87
5.2.5 Hietogramas	88
5.2.6 Hidrogramas	89
5.3 Modelación hidráulica	90
5.3.1 Datos generados mediante técnicas de fotogrametría y GIS.....	91
CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados	94
6.1 Proceso de obstrucción por sedimentos en el concreto permeable.....	94
6.2 Datos de entrada para la modelación de inundaciones	98
6.2.1 Datos de permeabilidad del suelo.....	98
6.2.2 Datos topográficos	100
6.3 Modelación hidráulica de inundaciones.....	101
CAPÍTULO VII: Conclusiones.....	103
REFERENCIAS.....	105
ANEXOS	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen comparativo de fortalezas y limitaciones de los modelos numéricos de inundaciones en zonas urbanas en función de sus clasificaciones.....	23
Tabla 2. Aplicaciones informáticas conocidas para el modelado hidrodinámico y simulación de inundaciones.....	24
Tabla 3. Capacidad de los enfoques de modelado para representar el proceso de inundaciones en zonas urbanas, principales datos requeridos y resultados probables.....	26
Tabla 4. Precisión relativa, requisitos de tiempo de ejecución y escala adecuada de aplicación de los enfoques para el modelado numérico de inundaciones en zonas urbanas.....	27
Tabla 5. Comparación de la estructura básica de los modelos empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos.....	29
Tabla 6. Descripción detallada de los modelos conceptuales, basados en procesos físicos y empíricos.....	30
Tabla 7. Comparación de los modelos de lluvia-escorrentía con base en su estructura espacial....	32
Tabla 8. Zonas urbanas de la ciudad de Aguascalientes que son vulnerables a inundaciones.....	33
Tabla 9. Características de los materiales de obstrucción granular en las simulaciones numéricas. Para estimar el número y la masa de partículas sólidas, se consideró una forma completamente esférica y una densidad de 2650 kg/m ³ , como lo informaron Das y Sobhan [26] para partículas sólidas de arena de cuarzo.....	43
Tabla 10. Parámetros de modelado utilizados en las simulaciones. El tiempo de liberación de partículas corresponde al período en el que los materiales obstructivos ingresan al modelo desde la parte superior del mismo. Dos segundos después de la liberación de partículas, permitiendo primero que se establezca el flujo laminar de agua dentro de los poros.....	44
Tabla 11. Características geomorfológicas e hidrológicas de las subcuencas.....	46
Tabla 12. Valores del número de curva para áreas agrícolas, urbanas y rurales en función del tipo de cobertura y el grupo hidrológico del suelo.....	47
Tabla 13. Criterios de asignación del grupo hidrológico del suelo en función de la conductividad hidráulica saturada.....	48
Tabla 14. Categorías de textura y estructura del suelo para la estimación del parámetro α mediante la inspección en el sitio.....	50
Tabla 15. Características de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio.....	52
Tabla 16. Valores de los parámetros estadísticos de las series anuales de precipitación 1004 y 1097.....	54
Tabla 17. Factor de frecuencia K_n de la distribución normal en función de la probabilidad de no excedencia.....	55
Tabla 18. Valores de la variable reducida en la distribución Gamma incompleta de 2 parámetros.....	55
Tabla 19. Valor de la media reducida en la distribución Gumbel. N es el tamaño de la serie.....	57
Tabla 20. Valor de la desviación estándar reducida en la distribución Gumbel. N es el tamaño de la serie.....	58
Tabla 21. Números de curva CN de la cuenca de acuerdo con el tipo de cobertura y el grupo hidrológico del suelo.....	63
Tabla 22. Porcentaje de cobertura de suelo por clase y número de curva de cada subcuenca.....	64
Tabla 23. Tiempo de retardo, factor de gasto pico y parámetros del método SCS de cada subcuenca.....	65

Tabla 24. Parámetros del método de enrutamiento de Muskingum para el área hidrológica. 66

Tabla 25. Ajuste de los valores de altitud de las imágenes con base en el dato de referencia. 71

Tabla 26. Tipo de sedimentos en suspensión observados en función del caudal de descarga..... 78

Tabla 27. Porosidad obtenida a partir de los resultados experimentales de las muestras de concreto permeable..... 82

Tabla 28. Resultados experimentales de permeabilidad y velocidad de filtración de las muestras de concreto permeable..... 82

Tabla 29. Determinación del grupo hidrológico de cada subcuenca con base en el valor obtenido de conductividad hidráulica saturada del suelo. 84

Tabla 30. Valores de intensidad de lluvia en mm/hr obtenidos de la fórmula de Chen y los mapas de isoyetas de la SCT..... 87



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de las etapas clave que conforman el modelado de inundaciones.	22
Figura 2. Diagrama de flujo de los pasos requeridos para llevar a cabo el análisis hidrológico e hidráulico de un modelo de inundaciones.....	22
Figura 3. Visualización de la estructura espacial en los modelos de lluvia-escorrentía. A: Modelo agrupado, B: Modelo semidistribuido por subcuencas, C: Modelo distribuido por celdas de la cuadrícula.....	31
Figura 4. (a) Mapa del Estado de Aguascalientes (b) Ubicación de la cuenca La Hacienda junto con la red hidrográfica del cauce principal.....	34
Figura 5. Área de estudio de la zona donde se realizan las simulaciones numéricas hidráulicas (Área de inundación) e hidrológicas (Área hidrológica) junto con la red hidrográfica y las subcuencas...	35
Figura 6. Localización del área de estudio. La alineación con vegetación muestra la ubicación del tramo del arroyo La Hacienda.....	36
Figura 7. Curva granulométrica de la mezcla de agregados utilizada en la preparación de muestras de concreto permeable.....	37
Figura 8. Procedimientos de laboratorio para la obtención de muestras de concreto permeable. La figura (a) muestra una etapa de preparación de la muestra, (b) muestra el conjunto de muestras en moldes para la prueba y (c) muestra algunas de las muestras finales antes de la prueba de permeabilidad.....	38
Figura 9. Método de prueba de permeabilidad para muestras de concreto permeable y esquema de permeámetro de carga constante.....	39
Figura 10. Dominio del modelo y algunas de las principales características utilizadas en las simulaciones. a) Modelo conceptual con la estructura porosa, b) Mallado utilizado en la red porosa, y c) variación de la presión relativa en los fluidos porosos.....	41
Figura 11. Subdivisión del área hidrológica en subcuencas. Las uniones se refieren a los puntos del cauce principal donde las salidas de 2 o más subcuencas convergen.....	45
Figura 12. Delineado de los elementos de cada capa de cobertura de suelo en QGIS. La línea negra corresponde a la división de subcuencas.....	48
Figura 13. Permeámetro tipo Pask estándar durante una prueba de permeabilidad.....	49
Figura 14. Valores del factor de forma adimensional C en función de la altura y radio del pozo y de la textura del suelo.....	51
Figura 15. Valores máximos de lluvia en 24 horas utilizados para el análisis probabilístico de precipitaciones extremas.....	52
Figura 16. Valores de los parámetros de tormenta a, b y c en función de la razón de lluvia-duración.....	60
Figura 17. Recopilación de imágenes en el área de estudio. El círculo negro señala la ubicación del punto de despegue del dron en todos los vuelos. Los círculos azules indican la posición de la cámara al momento de capturar cada imagen. Las flechas negras muestran la dirección del arroyo.....	67
Figura 18. El recuadro rojo indica el grado de superposición frontal y lateral entre imágenes en el conjunto 1. Las figuras 3a y 3c muestran la superposición frontal de 66 %, mientras que las figuras 3b y 3d muestran la superposición lateral de 83 %.....	68

Figura 19. El recuadro rojo indica el grado de superposición frontal y lateral entre imágenes en el conjunto 2. Las figuras 3a y 3c muestran la superposición frontal (83 %), mientras que las figuras 3b y 3d muestran la superposición lateral (66 %).	69
Figura 20. Resumen gráfico de la metodología implementada para crear los modelos digitales a partir del procesamiento de datos geoespaciales.	70
Figura 21. Clasificación de los puntos de la nube con base en el nivel de confianza. La parte superior muestra la nube de puntos inicial, mientras que la parte inferior muestra la superficie rectangular después de eliminar los puntos con menor confianza y recortar los lados.	72
Figura 22. (a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Nube de puntos. El color verde indica la clasificación de vegetación alta (c) Nube de puntos después de eliminar la vegetación alta. (d) Malla poligonal resultante.	74
Figura 23. (a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Nube de puntos clasificada. Los colores corresponden a las siguientes clasificaciones: blanco=espacios vacíos, café oscuro=suelo, verde=vegetación alta, rojo=edificios, negro=pavimentos, azul=vehículos.	75
Figura 24. (a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Archivo ráster con resolución de 0.30m. Los colores corresponden a las siguientes clasificaciones: blanco = celdas sin datos, café = suelo, verde = vegetación alta, rojo = edificios, gris = pavimentos, morado = objetos artificiales. (c) Archivo ráster con celdas sin datos rellenas. (d) Archivo shape con resolución de 0.30 m.	76
Figura 25. Curva de clasificación de sedimentos propuesta para el modelo numérico de inundaciones.	77
Figura 26. Geometría y condiciones de frontera del modelo de simulación numérica. BC 1 y BC 2 son las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, respectivamente.	79
Figura 27. Dominio y condiciones de frontera del modelo hidráulico en el programa de modelación numérica HEC-RAS.	80
Figura 28. Mapa de uso y cobertura de suelo del área hidrológica obtenido mediante la aplicación de sistemas de información geográfica.	83
Figura 29. Localización de los puntos de muestreo donde se llevaron a cabo las pruebas de permeabilidad del suelo.	85
Figura 30. Valores de la serie 1004 y ajustes logrados con las funciones de distribución Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel.	86
Figura 31. Valores de la serie 1097 y ajustes logrados con las funciones de distribución Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel.	86
Figura 32. Curvas de intensidad-duración-frecuencia obtenidas aplicando la fórmula de Chen.	88
Figura 33. Hietogramas de precipitación obtenidos con el método de bloques alternados. El periodo de retorno (T_r) se indica en la parte superior derecha.	89
Figura 34. Hidrogramas calculados a la salida de la cuenca. El periodo de retorno (T_r) se indica en la parte superior derecha.	90
Figura 35. Arriba: MDE Fotogrametría 0.27 m. Abajo: MDE LiDAR INEGI 1.5 m. El área delimitada con líneas punteadas indica la ubicación del tramo donde se realizaron las simulaciones numéricas.	92
Figura 36. Modelos digitales derivados del procesamiento de datos. Arriba: Ortomosaico con resolución de 0.05 m. Abajo: Modelo de cobertura de suelo con resolución de 0.30 m.	93
Figura 37. Posición, trayectoria y velocidad de las partículas sólidas en las simulaciones 1 a 3 para el escenario 1. Se muestra el tiempo actual y la velocidad de filtración utilizada en estas simulaciones es 8.98 mm/s.	95

Figura 38. Posición, trayectoria y velocidad de partículas sólidas en las simulaciones de prueba 4 a 6 para el escenario 2. Se muestra el tiempo actual y la velocidad de filtración utilizada en este escenario fue de 2.43 mm/s.	96
Figura 39. Variación del porcentaje de partículas atrapadas en las simulaciones. Las simulaciones comienzan con un atrapamiento del 100 % a medida que las partículas se liberan en el modelo. Una vez que las partículas se liberaron por completo, el porcentaje comenzó a disminuir. De hecho, el tiempo de simulación en el que las líneas (excepto en la simulación 1) ya no son horizontales corresponde al tiempo al final del paso 2.	97
Figura 40. Carta geológica de la sección del área hidrológica que muestra los tipos de suelo y roca existentes.	99
Figura 41. Carta edafológica de la sección del área hidrológica que muestra los tipos de unidades edafológicas existentes.	99
Figura 42. Profundidades y extensión de inundación determinadas mediante simulaciones numéricas en HEC-RAS para los MDEs obtenidos de fotogrametría y LiDAR. En cada fila, t indica el tiempo de simulación en horas, minutos, segundos, y Q es el caudal en m3/s.	100
Figura 43. Modelación hidráulica en HEC-RAS. La parte superior muestra las variables de profundidad y alcance de inundación. La parte inferior muestra las variables de alcance y concentración de sedimentos. El recuadro superior derecho indica el tiempo y el caudal simulado.	102

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACI	Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute)
AMC	Condición de Humedad Antecedente (Antecedent Moisture Condition)
ARF	Factor de Reducción de Área (Areal Reduction Factor)
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
BeiDou BDS	Sistema de Navegación por Satélite BeiDou (BeiDou Navigation Satellite System)
CFD-DEM	Dinámica de Fluidos Computacional - Método de Elementos Discretos (Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method)
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CPU	Unidad Central de Procesamiento (Central Processing Unit)
CRS	Sistema de Coordenadas de Referencia (Coordinate Reference System)
ESA	Agencia Espacial Europea (European Space Agency)
GCP	Punto de Control del Terreno (Ground Control Point)
GIS	Sistema de Información Geográfica (Geographic Information System)
GLONASS	Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System)
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
GPU	Unidad de Procesamiento Gráfico (Graphics Processing Unit)
HEC-HMS	Centro de Ingeniería Hidrológica – Sistema de Modelación Hidrológica (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System)
HEC-RAS	Centro de Ingeniería Hidrológica – Sistema de Análisis de Ríos (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System)
IDF	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (Intensity-Duration-Frequency Curves)
IMPLAN	Instituto Municipal de Planeación y Evaluación de Aguascalientes
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía

ITRF	Marco de Referencia Terrestre Internacional (International Terrestrial Reference Frame)
LID	Desarrollo de Bajo Impacto (Low Impact Development)
LiDAR	Detección y Medición de Distancias por Luz (Light Detection and Ranging)
MCS	Modelo de Cobertura de Suelo
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
NASEM	Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine)
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service)
PRF	Factor de Caudal Pico (Peak Rate Factor)
QGIS	Sistema de Información Geográfica Quantum (Quantum GIS)
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio (Random Access Memory)
SAGA	Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos (System for Automated Geoscientific Analyses)
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SfM	Fotogrametría de Estructura a partir del Movimiento (Structure from Motion Photogrammetry)
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (Sustainable Urban Drainage Systems)
USACE	Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (United States Army Corps of Engineers)
USCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System)
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture)
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (Universal Transverse Mercator)
WSUD	Diseño Urbano Sensible al Agua (Water Sensitive Urban Design)

RESUMEN

La presente tesis pretende arrojar claridad sobre el proceso de inundaciones en zonas urbanas y el funcionamiento hidráulico de los sistemas de infiltración de agua de concreto permeable, ya que esto puede contribuir a un mejor aprovechamiento del agua pluvial al tiempo que se mitigan las inundaciones en zonas urbanas. El transporte de sedimentos es uno de los fenómenos que más afecta a los sistemas de infiltración de agua de concreto permeable, ya que reduce su capacidad hidráulica de infiltrar el agua, y mediante modelación numérica se analizó dicho fenómeno. Por otra parte, se obtuvieron datos de entrada para el desarrollo de un modelo numérico de inundaciones, el cual permite generar pronósticos para alertar a la población y a las autoridades sobre las zonas urbanas con mayor vulnerabilidad a inundarse. El objetivo principal de esta tesis es superar la falta de datos de entrada que existe actualmente en la modelación numérica, para contribuir al desarrollo de modelos numéricos que ayuden a entender el proceso de inundaciones en zonas urbanas y el funcionamiento de los sistemas de infiltración de agua. Esto mediante la mejora de las técnicas de obtención, procesamiento e integración de dichos datos de entrada. La permeabilidad y porosidad del concreto permeable se determinaron de manera experimental, y estos resultados se utilizaron para desarrollar un modelo numérico que analiza la obstrucción por sedimentos. Por otra parte, se proponen metodologías para obtener datos topográficos y de uso de suelo utilizando técnicas de fotogrametría y sistemas de información geográfica. Se llevó a cabo un análisis hidrológico en una cuenca urbana no aforada de Aguascalientes para estimar los procesos de precipitación, infiltración y escorrentía mediante modelación hidrológica, aplicando métodos empíricos. Se propone también una metodología para determinar la permeabilidad del suelo in situ utilizando un permeámetro tipo Pask. Además, se realizó un análisis estadístico para determinar la precipitación en la cuenca con base en los registros históricos de las estaciones meteorológicas más cercanas, y los resultados muestran las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia y los hietogramas en función de varios periodos de retorno. La investigación concluye con recomendaciones para mejorar la confiabilidad de los modelos numéricos.

ABSTRACT

This thesis aims to shed light on the flooding process in urban areas and the hydraulic functioning of pervious concrete water infiltration systems, as this can contribute to better use of stormwater while mitigating flooding in urban areas. Sediment transport is one of the phenomena that most affects pervious concrete water infiltration systems, as it reduces their hydraulic capacity to infiltrate water. This phenomenon was analyzed through numerical modeling. Input data were also obtained for the development of a numerical flood model, which allows generating forecasts to alert the population and authorities about urban areas most vulnerable to flooding. The main objective of this thesis is to overcome the current lack of input data in numerical modeling and contribute to the development of numerical models that help understand the flooding process in urban areas and the functioning of water infiltration systems. This is achieved by improving the techniques for obtaining, processing, and integrating such input data. The permeability and porosity of pervious concrete were determined experimentally, and these results were used to develop a numerical model that analyzes sediment clogging. Methodologies are also proposed for obtaining topographic and land-use data using photogrammetry techniques and geographic information systems. A hydrological analysis was carried out in an ungauged urban watershed in Aguascalientes to estimate precipitation, infiltration, and runoff processes through hydrological modeling, applying empirical methods. A methodology is also proposed to determine in situ soil permeability using a Pask-type permeameter. In addition, a statistical analysis was performed to determine precipitation in the watershed based on historical records from the nearest meteorological stations. The results show intensity-duration-frequency curves and hyetographs based on various return periods. The research concludes with recommendations for improving the reliability of the numerical models.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

CAPÍTULO I: Planteamiento del Problema

Introducción

Las inundaciones representaron aproximadamente el 43 % de todos los desastres naturales registrados en las últimas 3 décadas (Ritchie et al., 2025) y se estima que para 2030 estas cifras seguirán aumentando debido a los efectos de la creciente urbanización y el cambio climático (Kuzma & Luo, 2020). Muchas ciudades y, en particular, los sectores más vulnerables de la población no están preparados para afrontar los riesgos asociados a las inundaciones, a pesar de las consecuencias catastróficas que pueden tener (Bang & Burton, 2021; Kumar et al., 2023). El fenómeno de inundaciones en entornos antrópicos es inducido principalmente por la escorrentía de tormentas extremas (Rosenzweig et al., 2018; Meng et al., 2019; Bulti & Abebe, 2020). Los encharcamientos y los flujos superficiales se van incrementando a medida que los componentes de la red de drenaje de una zona urbana alcanzan su capacidad máxima y la capacidad de infiltración del suelo es rebasada por la cantidad de precipitación aportada por la tormenta (Azizi et al., 2022).

En respuesta a la necesidad de mitigar las inundaciones en zonas urbanas de una manera más sostenible, se ha prestado cada vez más atención al aumento de la infiltración natural de agua en el subsuelo, mediante la instalación de estructuras conocidas como sistemas de infiltración de agua (Pour et al., 2020). Estas estructuras tienen como objetivo controlar el exceso de escorrentía, restaurando el equilibrio hídrico natural en las cuencas que han sido urbanizadas (Funke & Kleidorfer, 2024). A nivel mundial, una serie de terminologías han sido acuñadas para referirse a los sistemas de infiltración de agua que cumplen con este propósito: en Europa se creó el concepto de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), en los Estados Unidos se denominan técnicas de desarrollo de bajo impacto (LID), en Australia se refieren a diseños urbanos sensibles al agua (WSUD), en China se creó el concepto de ciudades esponja, entre otros (Eckart et al., 2017).

A pesar de la importancia de los sistemas de infiltración de agua en la mitigación de inundaciones en entornos urbanos, los lugares para la colocación de dichos sistemas son difíciles de encontrar (Liu et al., 2021). Se deben realizar estudios previos para verificar que se cumpla con una serie de requisitos, ya que el funcionamiento exitoso de los sistemas de infiltración dependerá en gran medida de las condiciones del sitio (Eisenberg et al., 2015; Eckart et al., 2017). En el caso de los sistemas de infiltración de concreto permeable, una de las condiciones más importantes es garantizar que el transporte de sedimentos en la escorrentía captada sea mínimo o nulo, ya que las

partículas sólidas provocan obstrucciones que afectan la capacidad de infiltración (Kia et al., 2017; Singh et al., 2020).

El fenómeno del transporte de sedimentos está estrechamente relacionado con las inundaciones, ya que la fuerza de arrastre del agua de las escorrentías pluviales activa el arrastre de sedimentos (Vázquez-Tarrío et al., 2024). El transporte de sedimentos se refiere al fenómeno geofísico derivado de las interacciones entre el flujo de agua y las partículas de sedimentos, es decir, es un proceso que involucra la erosión, transporte y deposición de partículas sólidas de un lugar a otro (Yang, 1996). El término sedimento no se refiere a granos individuales, sino a una mezcla de innumerables partículas de diferentes tamaños, formas y composiciones minerales (Chien & Wan, 1999).

¿Qué relación tiene la modelación numérica con el proceso de inundaciones y los sistemas de infiltración de agua? La respuesta es que las modelaciones numéricas pueden ayudar a generar y desarrollar pronósticos y sistemas de alerta temprana, los cuales son cruciales para prevenir los daños causados por las inundaciones en zonas urbanas, ya que informan a la población y a las autoridades sobre riesgos inminentes con antelación y credibilidad (Linhm & Nicholls, 2010). Estos pronósticos implican la predicción de futuras precipitaciones, caudales de descarga de los ríos o arroyos, extensión de las inundaciones, entre otros (Jain et al., 2017). La confiabilidad de los pronósticos de inundaciones ha aumentado recientemente debido a los avances en la modelación numérica (Jain et al., 2017). Actualmente, el modelado numérico es el enfoque predominante para pronosticar los fenómenos de inundaciones en zonas urbanas, seguido por los análisis estadísticos (Jodhani et al., 2023). Por esta razón, mejorar la capacidad de los modelos numéricos es una tarea fundamental que debe ser abordada para que las autoridades y la población en riesgo puedan iniciar respuestas apropiadas y elaborar mejores planes de desarrollo urbano.

Los modelos numéricos de inundaciones son representaciones matemáticas que permiten predecir el comportamiento de un río o arroyo durante una tormenta e identificar áreas propensas a inundarse (Cea et al., 2025). La investigación sobre modelado de inundaciones ha sido extensa a lo largo de los años, lo que ha llevado al desarrollo de una amplia gama de enfoques, bases de datos y metodologías (Qi et al., 2021; Tom et al., 2022; Hill et al., 2023; Jodhani et al., 2023; Cea et al., 2025). A pesar de ello, la modelación de inundaciones sigue siendo un desafío debido a la complejidad del proceso de inundaciones, ya que este puede estar sujeto a incontables factores, como por ejemplo, el comportamiento hidrodinámico del flujo, la topografía del terreno, las características físicas de los cauces, los patrones de lluvia, las estructuras antrópicas y de drenaje existentes, el tipo de suelo, la

capacidad de infiltración del suelo, entre otros (Teng et al., 2017; Brunner et al., 2021; Luo et al., 2022). Además, todos los factores involucrados pueden variar de una localidad a otra, lo cual dificulta la aplicabilidad universal de los modelos, ya que una técnica de modelación numérica que pueda capturar de manera óptima todos los aspectos de las inundaciones aún no es realista (Nkwunonwo et al., 2020).

El desarrollo y aplicación de modelos numéricos puede fortalecer la comprensión del fenómeno de inundaciones en zonas urbanas, así como las posibles medidas de mitigación de esta problemática, como es el caso de los sistemas de infiltración de agua. Los pronósticos y los mapas generados mediante la modelación numérica pueden facilitar la identificación de las zonas de mayor riesgo de inundaciones, así como los lugares más adecuados para la aplicación potencial de sistemas de infiltración de agua. De este modo, las autoridades y la población pueden elaborar estrategias y planes de prevención más resilientes.

La investigación reciente se ha enfocado en desarrollar y mejorar las aplicaciones informáticas o programas que permiten modelar numéricamente la hidrología y la hidráulica del proceso de inundaciones y los sistemas de infiltración de agua, así como efectuar simulaciones bajo diferentes escenarios. Estos programas han alcanzado un grado de sofisticación adecuado. No obstante, la falta de datos de entrada que se requieren para construir los modelos numéricos sigue siendo un nicho de oportunidad sin resolver, y en muchos casos no existen técnicas para obtenerlos.

Los datos de entrada de un modelo numérico de inundaciones están estrechamente relacionados con los procesos hidrológicos e hidráulicos que tienen lugar en la cuenca de la zona urbana analizada, ya que nos dicen qué cantidad de precipitación puede caer sobre dicha cuenca, cuánta de esta precipitación se infiltra de manera natural a través del suelo, cuánta se convierte en escorrentía superficial y provoca las inundaciones, y cuál es el transporte de sedimentos durante la inundación.

Objetivos de la tesis

El objetivo principal de esta tesis es superar la falta de datos de entrada que existe actualmente en la modelación numérica, para contribuir al desarrollo de modelos numéricos que ayuden a entender el proceso de inundaciones en zonas urbanas y el funcionamiento de los sistemas de infiltración de agua. Esto mediante la mejora de las técnicas de obtención, procesamiento e integración de dichos datos de entrada.

Los objetivos particulares se enlistan a continuación:

Objetivo particular 1. Proporcionar conocimientos sobre el proceso de obstrucción por sedimentos que afecta el rendimiento hidráulico del sistema de infiltración de agua de concreto permeable, mediante el análisis de los resultados de los modelos numéricos aplicados en muestras experimentales de concreto permeable.

Pregunta 1.1. ¿Cuánto tiempo tarda el concreto permeable en obstruirse por un flujo de partículas sólidas y cuál es el tamaño de las partículas que causan obstrucciones?

Pregunta 1.2. ¿Cómo influyen las heterogeneidades de la red porosa del concreto permeable en la obstrucción por partículas sólidas?

Pregunta 1.3. ¿Cuál es la trayectoria y velocidad principales de las partículas sólidas que pueden causar obstrucción en el concreto permeable?

Objetivo particular 2. Evaluar los datos de entrada que se pueden obtener para la modelación numérica de inundaciones en zonas urbanas. Este objetivo incluye lo siguiente: (1) la delimitación de una cuenca hidrológica a pequeña escala en una zona urbana, (2) la estimación de los procesos hidrológicos e hidráulicos de precipitación, infiltración, escorrentía superficial y transporte de sedimentos en dicha cuenca, (3) la obtención de la topografía precisa de la zona de inundación utilizando dispositivos de detección remota y técnicas de fotogrametría y GIS.

Pregunta 2.1. ¿Cuál es la capacidad de infiltración o permeabilidad del suelo en la cuenca hidrológica y mediante qué dispositivos y técnicas puede determinarse?

Pregunta 2.2. ¿Qué volumen máximo de escorrentía se puede presentar a la salida de la cuenca hidrológica, en función de un periodo de retorno dado?

Pregunta 2.3. ¿Cómo influye la precisión y resolución de los datos topográficos y de uso de suelo en estimar el alcance y extensión de una inundación?

Objetivo particular 3. Aportar entendimiento sobre los procesos que generan inundaciones en zonas urbanas, mediante el desarrollo de un modelo numérico de inundaciones que utilice los datos de entrada del objetivo anterior.

Pregunta 3.1 ¿Qué fuentes de datos proporcionan mejores resultados para el desarrollo de modelos de inundación?

Pregunta 3.2 ¿Qué tan sensible es el modelo de inundación a medida que se aumenta la intensidad y frecuencia de las lluvias extremas en función de un periodo de retorno?

Organización de la tesis

La narrativa por capítulos se describe a continuación:

CAPÍTULO I. Presenta el planteamiento general del problema de investigación, junto con los objetivos y la organización del documento. El estudio aborda la problemática de inundaciones en zonas urbanas, desde un contexto de modelaciones numéricas y análisis de sistemas de infiltración de agua.

CAPÍTULO II. Muestra una descripción del estado actual del conocimiento en el contexto de la modelación numérica de inundaciones, indicando los últimos avances y desafíos en este campo.

CAPÍTULO III. Aquí se establecen los fundamentos conceptuales, empíricos y metodológicos que guían la investigación. Se incluyen principios básicos de la modelación numérica de inundaciones, así como las etapas clave para su desarrollo. Se muestra un resumen de los principales enfoques tanto para el modelado hidrológico como para el modelado hidráulico de inundaciones.

CAPÍTULO IV. Este apartado contiene el marco metodológico empleado en la investigación. Incluye el área de estudio donde se aborda la problemática de las inundaciones, es decir, una cuenca hidrológica con un arroyo como punto de salida, y una zona de inundación donde se presentan las afectaciones. Se describen también las técnicas y procedimientos empleados para obtener datos de entrada, considerando 3 tipos de modelaciones numéricas: un sistema de infiltración de agua de concreto permeable, un sistema hidrológico de una cuenca de una zona urbana, y un sistema hidráulico de una zona urbana inundable.

CAPÍTULO V. Presenta los resultados, desglosados de manera acorde a cada tipo de modelación numérica, como ya se mencionó en el capítulo anterior de metodología. La primera sección muestra la porosidad y permeabilidad del concreto permeable que se determinó de manera experimental. La segunda sección muestra los datos obtenidos de uso de suelo, permeabilidad del suelo y el análisis de frecuencias que se llevó a cabo para obtener las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, así como los hietogramas y los hidrogramas de diseño.

CAPÍTULO VI. Muestra la discusión de resultados. Se incluyen discusiones sobre el modelo numérico que analiza la obstrucción por sedimentos en el concreto permeable. Se muestra una interpretación de los datos de permeabilidad del suelo obtenidos en campo y los datos topográficos obtenidos con técnicas de fotogrametría y GIS. Por último, se discute sobre el modelo numérico de inundaciones que se pudo desarrollar con los datos de entrada obtenidos.

CAPÍTULO VII. Contiene las conclusiones generales de la investigación.



CAPÍTULO II: Estado del Arte

Al efectuar una revisión del estado del arte sobre el tema de modelación numérica de inundaciones en zonas urbanas, se encontró que las herramientas o programas informáticos existentes para crear dichos modelos han alcanzado un nivel adecuado de sofisticación y madurez, por lo que los esfuerzos no deben enfocarse en mejorar o expandir la base del conocimiento, sino en explotar al máximo las capacidades de los modelos numéricos existentes, enfocándose en aspectos particulares de las etapas de su desarrollo, tal y como se indica en la Figura 1 de la sección 3.3 (Cea & Costabile, 2022; Hill et al., 2023; Cea et al., 2025).

Varios estudios señalan la falta de datos para el desarrollo y calibración de los modelos como una de las principales limitaciones actuales de las etapas de desarrollo. Nkwunonwo et al. (2020) realizaron una síntesis del estado actual enfocándose en países en desarrollo y encontraron que, en el caso de los datos topográficos, incluso cuando están disponibles existe la preocupación de que la precisión horizontal y vertical no sea lo suficientemente buena para producir resultados realistas. Tampoco existen datos hidráulicos de inundaciones históricas que muestren la profundidad y extensión de las inundaciones, el tiempo de inundación y la velocidad del flujo. En una revisión adicional, Hill et al. (2023) señalan que, aunque existen datos de uso de suelo de libre acceso, como los derivados de imágenes satelitales, la resolución espacial no es adecuada o la información que contienen está desactualizada, por lo que no se pueden utilizar para estudios de pequeña escala.

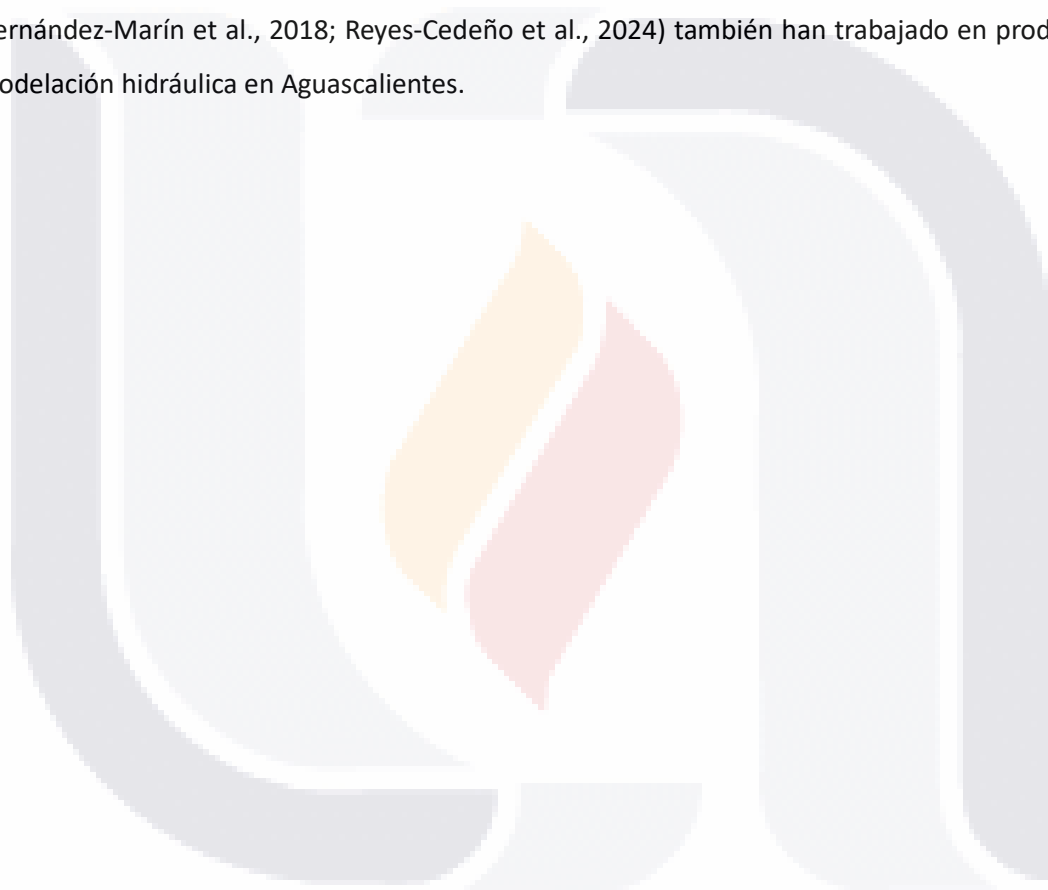
La calidad de los datos utilizados para la modelización de inundaciones debe actualizarse y mejorarse para superar estas limitaciones, y los esfuerzos deben enfocarse en la mejora de las técnicas de recopilación, procesamiento e integración de los conjuntos de datos, así como en utilizar tecnologías de detección remota e inteligencia artificial. (Qi et al., 2021; Jodhani et al., 2023; Kumar et al., 2023).

Los principales desafíos que existen actualmente en la modelización de inundaciones surgen al adoptar un enfoque hidrodinámico 2D como parte del análisis. Por ejemplo, Hill et al. (2023) sugieren aplicar los modelos en cuencas hidrográficas urbanas con una extensión menor a 100 km², lo que implica contar con datos de alta resolución. Nkwunonwo et al. (2020) señalan que los avances en los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y las tecnologías de detección remota ofrecen una herramienta viable para superar la escasez de datos, pero factores como el costo de la adquisición, la experiencia en el procesamiento de datos, el manejo de sensores remotos y los requisitos de los softwares pueden ser abrumadores.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Numerosos estudios recientes también han tenido que desarrollar modelos hidrológicos y ajustes de distribuciones de probabilidad para determinar lluvias y caudales máximos en zonas donde no existen datos hidráulicos (Umar & Gray, 2023). Los Sistemas GIS o los programas informáticos que integran esta tecnología ofrecen aplicaciones importantes en el campo de estudio del modelado de inundaciones, ya que permiten procesar los datos y obtener la cartografía de las inundaciones, pero su manejo requiere tiempo y habilidades técnicas (Morante-Carballo et al., 2022; Tom et al., 2022).

Por último, es importante mencionar que otros investigadores (Guerrero-Martínez et al., 2018; Hernández-Marín et al., 2018; Reyes-Cedeño et al., 2024) también han trabajado en productos de modelación hidráulica en Aguascalientes.



CAPÍTULO III: Marco Teórico

El marco teórico incluye algunos de los principales enfoques utilizados para realizar modelaciones numéricas de inundaciones. Las modelaciones hidráulicas permiten determinar el alcance del agua y de los sedimentos durante una inundación, entre otros, pero requieren una gran cantidad de datos. Por otra parte, las modelaciones hidrológicas permiten obtener datos en zonas urbanas donde no hay información de las escorrentías que se presentan durante las inundaciones. Se han identificado también las etapas más importantes en el desarrollo de un modelo numérico de inundaciones.

3.1 Modelado y Simulación Numérica de Inundaciones

El modelado numérico es una representación matemática de un sistema físico complejo, utilizando herramientas numéricas e informáticas para estudiar el rendimiento de dicho sistema en diversos escenarios del mundo real (Kassab, 2025). Se basa en hipótesis relevantes y suposiciones simplificadoras (Sirois & Grilli, 2015) e implica la selección de un conjunto de ecuaciones para simular el comportamiento del sistema analizado y luego utilizar técnicas numéricas adecuadas (P. Ej. programas informáticos) para resolver dichas ecuaciones (Larson, 2005). El desafío del modelado numérico es la complejidad de la preparación del modelo, la dificultad para elaborar una descripción exacta del problema real y la interpretación de los resultados (Brischke & Humar, 2017).

Particularmente, el modelado de inundaciones es un tipo de modelado numérico que simula cómo fluye el agua en un sistema físico (Wu et al., 2024). Es importante tener en cuenta la diferencia entre los conceptos de modelado numérico y simulación numérica. Las simulaciones numéricas son cálculos que se ejecuta en un ordenador, utilizando un programa que implementa un modelo matemático (Musolino, 2021). En otras palabras, el modelado numérico es el proceso de crear el modelo matemático, mientras que las simulaciones numéricas hacen referencia al proceso de calcular dicho modelo para obtener las soluciones (Allaire, 2007).

En esta investigación, el sistema de interés que se quiere representar de manera matemática es una zona urbana sujeta a inundaciones pluviales.

3.2 Calibración, validación y verificación de un modelo de inundaciones

La calibración, validación y verificación son elementos clave en cualquier modelación numérica, ya que le dicen al usuario cuál es la capacidad del modelo o qué tan bien logra representar los procesos de la realidad. Debe recordarse que los modelos de inundaciones tratan de representar procesos hidrológicos como la cantidad de escorrentía generada en una cuenca, o procesos hidráulicos como el alcance y extensión del agua durante la inundación. Dendrou (1982), Knapp (1991) y Larson (2005) proporcionan una descripción de estos conceptos, como se indica a continuación.

La calibración es la modificación de los parámetros del modelo para reducir el error entre lo que se determinó con las simulaciones y lo que realmente ocurre en un evento real. El resultado del cálculo que es más cercano a las mediciones reales define los valores óptimos de los parámetros, produciendo un modelo calibrado.

En cambio, la validación es una prueba de la capacidad del modelo para estimar lo que puede ocurrir fuera del período de calibración, cuando se simulan otros eventos. Esto implica descubrir si el modelo representa correctamente los procesos subyacentes, y no sólo se ajusta a los datos históricos de un evento particular. Se establece con datos medidos en los eventos reales si las ecuaciones del modelo describen satisfactoriamente el sistema y con qué precisión. Por su parte, la verificación implica investigar el rango de condiciones en las que el modelo produce resultados aceptables y qué aplicabilidad tiene en otras zonas.

3.3 Etapas clave para el desarrollo de un modelo de inundaciones

Kumar et al. (2023) identificaron de manera general las etapas involucradas en el modelado de inundaciones en zonas urbanas, tal y como se muestra en el diagrama de la Figura 1. Esta metodología puede variar dependiendo del tema particular abordado y la elección del enfoque.

Las etapas de modelado hidrológico e hidráulico son dos eslabones cruciales y una metodología recomendada para abordarlas se muestra en la Figura 2. El modelado hidrológico es necesario en cuencas no aforadas donde no existen mediciones reales de los caudales que se presentan durante los eventos de lluvia. Consiste en determinar la escorrentía en diferentes ubicaciones del río o arroyo, y para ello es necesario recopilar datos que representen las características de la zona de estudio, como son: topografía, uso de suelo, patrones de precipitación, evaporación, humedad y permeabilidad del suelo. En cambio, el análisis hidráulico se utiliza para determinar el alcance y

extensión del agua en la llanura aluvial durante la inundación, con base en las escorrentías que se pueden generar en la cuenca de estudio.



Figura 1. Diagrama de flujo de las etapas clave que conforman el modelado de inundaciones (Tomado de Kumar et al., 2023).

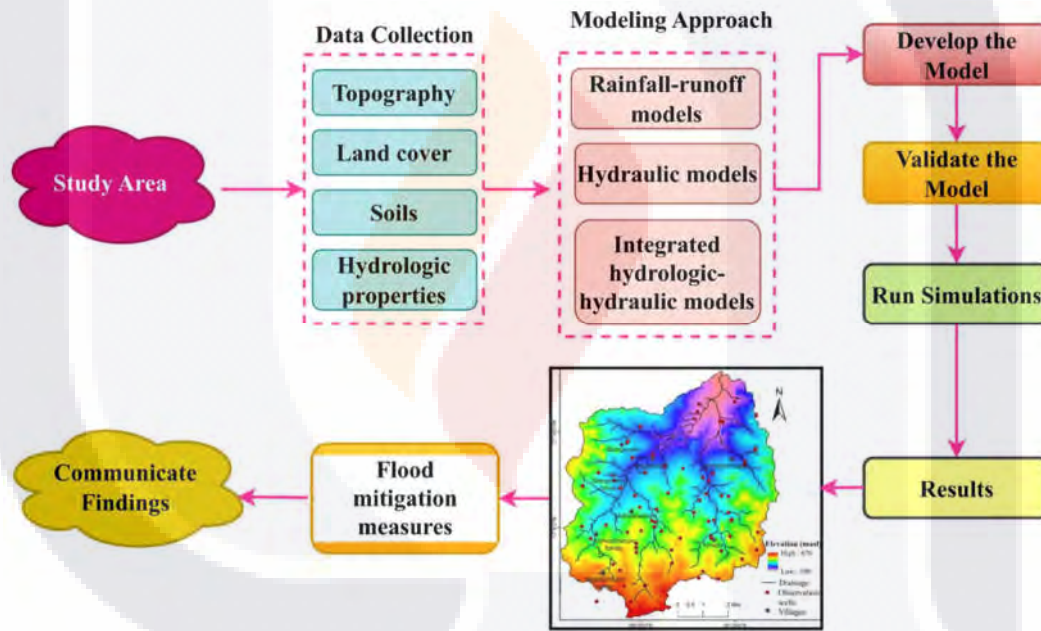


Figura 2. Diagrama de flujo de los pasos requeridos para llevar a cabo el análisis hidrológico e hidráulico de un modelo de inundaciones (Tomado de Kumar et al., 2023).

3.4 Enfoques para el modelado hidráulico de inundaciones

Dentro de las revisiones recientes del estado del arte que se han realizado sobre los diferentes enfoques de modelado numérico de inundaciones en zonas urbanas, destacan los trabajos de Teng et al. (2017) y Tom et al. (2022) que propusieron la siguiente clasificación:

- 1) Métodos Empíricos. Basados en representaciones de la realidad, es decir, en datos que pueden incluir mediciones del terreno, fotografías aéreas, imágenes satelitales, encuestas y entrevistas.
- 2) Modelos Hidrodinámicos. Simulan el movimiento del agua mediante la solución de ecuaciones formuladas con la ayuda de la aplicación de las leyes de la física. Según su representación espacial del flujo de llanura aluvial, se agrupan en modelos 1D, 2D y 3D. El flujo de llanura aluvial se refiere al movimiento de agua que ocurre cuando un río o arroyo se desborda y cubre la llanura aluvial circundante.
- 3) Modelos Conceptuales. Basados en conceptos hidráulicos simplificados. A diferencia de los modelos hidrodinámicos, no implican ninguna simulación del proceso físico de inundación.

Las fortalezas y limitaciones generales de las categorías de modelado más amplias y su idoneidad para los diversos estudios de inundaciones se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen comparativo de fortalezas y limitaciones de los modelos numéricos de inundaciones en zonas urbanas en función de sus clasificaciones (Adaptado de Tom et al., 2022).

Clasificación del modelo	Fortalezas	Limitaciones	Recomendaciones de aplicación
Empírico	Simplificación de los procesos físicos	Resolución espacial y temporal gruesa	Adecuado para la evaluación de daños por inundaciones y el monitoreo de inundaciones
	Mayor estabilidad numérica	No considera la hidrología y la hidrodinámica, por lo que no es del todo adecuado para escenarios de modelado	
		Confía en la ciencia derivada de los datos observados en el pasado	
		Los errores pueden propagarse fácilmente desde los datos de entrada a las salidas	
		Las limitaciones de ingeniería, como los valores predeterminados de los sensores, los errores de transmisión y el procesamiento, se pueden propagar fácilmente en las entradas del modelo	
Hidrodinámico	Captura la hidrología y la hidrodinámica del sitio (permite la simulación del sistema hidrológico del sitio)	Intensivo en requerimientos computacionales debido a la hidrodinámica y a la hidráulica, además de que requiere de una gran cantidad de datos	Múltiples aplicaciones tales como evaluación de daños y riesgo por inundaciones, planeación de recursos hidráulicos, hidrología de sistemas de ríos, estudios de modelado de transporte de sedimentos, entre otros
	Estimaciones precisas de las inundaciones en términos de duración, además del volumen y profundidad	Los errores en los datos de entrada pueden propagarse en el tiempo y multiplicarse en la cadena de procesamiento.	

Conceptual	Simple y fácil de usar	Se supone el término de inercia al resolver las ecuaciones de aguas poco profundas, lo que simplifica la ecuación de momento al descuidar el término de aceleración convectiva	Es aplicable a la evaluación de riesgo por inundaciones, planeación de recursos hidráulicos, modelado de escenarios e hidrología de cuencas, entre otros
	Menos requerimientos computacionales	La representación de la dinámica de flujo es limitada	

Tabla 2. Aplicaciones informáticas conocidas para el modelado hidrodinámico y simulación de inundaciones (Adaptado de Teng et al., 2017).

Desarrollador	1D	2D	1D+2D	3D	Estatus	Notas
Environmental xprt		Flowroute			Comercial	
Universidad Nacional Australiana		ANUGA Hydro			Código abierto	https://anuga.anu.edu.au/
BMT Commercial Australia Pty Ltd	TUFLOW Classic 1D	TUFLOW Classic 2D, TUFLOW GPU	TUFLOW Classic	TUFLOW FV	Comercial	
Universidad de Cardiff	FASTER	DIVAST, DIVAST-TVD			Investigación	Es la base de ISIS 2D
CH2M Hill (anteriormente Halcrow Group)	Flood Modeller Pro 1D	Flood Modeller Pro 2D	Flood Modeller Pro		Comercial	Flood Modeller Pro es el sucesor de la suite ISIS
CSIRO				SPM	Investigación	
Deltares	Suite SOBEK	Suite SOBEK	Suite SOBEK	DELFT3D	Comercial	DELFT3D es de código abierto
DHI (Danish software company)	MIKE11/MIKE HYDRO	MIKE21	MIKE Flood	MIKE 3	Comercial	
Electricite de France	MASCARET	TELEMAC 2D		TELEMAC 3D	Código abierto	
HR-Wallingford Innovyze	InfoWorks RS	InfoWorks 2D	InfoWorks ICM		Comercial	Utiliza el motor de simulación de flujo ISIS
JBA Consulting		JFOW			Comercial	
Universidad de Nottingham		TRENT	TRENT		Investigación	
Svasek Hydraulics		FINEL 2D		FINEL 3D	Comercial	
Universidad de Tokyo		CaMa-Flood			Investigación	Modelo a escala global.
Universidad de Bristol		LISFLOOD-FP	LISFLOOD-FP		Investigación	
Universidad de California		BreZo			Investigación	
Universidad de Exeter	SIPSON	UIM	UIM + SIPSON		Investigación	
United States Army Corps of Engineers	HEC-RAS	HEC-RAS 2D			Libre	http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras
XP Solutions		XP2D	XPSWM, M,		Comercial	

			XPSTOR M			
ANSYS				CFX, Fluent	Comercial	
Autodesk				Bifrost	Comercial	Como parte del software Autodesk Maya
Blender				Blender	Código abierto	https://www.blender.org
Chaos Group				PHEONIX	Comercial	
DPIT				Navié, Effex	Comercial	
Universidad de Kyushu				Flip3D	Código abierto	https://code.google.com/p/flip3d
Maxon				Cinema 4D	Comercial	
Next Limit				RealFlow	Comercial	
Red Giant				Psunami	Comercial	
Side Effects Software				Houdini	Comercial	
Universidad Técnica de Múnich				Mantaflow	Código abierto	http://mantaflow.com

Asimismo, la Tabla 2 enlista algunos programas típicos que son capaces de crear modelos hidrodinámicos, sus desarrolladores y el tipo de licencia. Por otra parte, Bulti y Abebe (2020) también presentaron una revisión de los enfoques para el modelado de inundaciones, principalmente de los modelos hidrodinámicos. Los enfoques se clasificaron con base en la dimensión espacial y el tipo de proceso de flujo que se está representando, de la siguiente manera:

- 1) Propagación rápida de flujo (RFS)
- 2) Red de drenaje unidimensional (Alcantarillado 1D)
- 3) Flujo superficial unidimensional (Superficial 1D)
- 4) Acoplamiento de alcantarillado 1D con flujo superficial 1D (Acoplamiento 1D-1D)
- 5) Flujo superficial bidimensional (Superficial 2D)
- 6) Acoplamiento de alcantarillado 1D con flujo superficial 2D (Acoplamiento 1D-2D)

Un aporte importante de esta revisión es el resumen de las principales características de los métodos hidrodinámicos, ya que se muestran de manera general las capacidades, los datos requeridos y la escala adecuada de aplicación en las Tablas 3 y 4. Esto permite tomar una mejor elección y más informada del enfoque adecuado para la investigación.

Tabla 3. Capacidad de los enfoques de modelado para representar el proceso de inundaciones en zonas urbanas, principales datos requeridos y resultados probables (Adaptado de Bulti & Abebe, 2020).

Enfoque de modelado	Salidas del modelo (Características de la inundación)					
	Representación de flujo terrestre	Ubicación de flujo	Alcance de Inundación	Profundidad de Inundación	Velocidad de flujo	Principales datos requeridos
RFS (Propagación rápida de flujo)	No	No	Sí, pero solo el estado final	Sí, pero solo el estado final	No	MDE
Superficial 1D	Sí, pero solo en redes de superficie	No	Sí, pero solo en redes de superficie	Sí, pero solo en redes de superficie	Sí, pero sólo en una dirección	MDE, redes de superficie (sistema principal)
Alcantarillado 1D	No	Sí	Sí, pero aproximado a almacenamiento virtual	Sí, pero aproximado a almacenamiento virtual	No	MDE, redes de drenaje pluvial (sistemas pequeños)
Superficial 2D	Sí, en 2D	No	Sí	Sí	Sí, en dos direcciones	MDE y otros datos topográficos
Acoplamiento 1D-1D	Sí, pero solo en redes de superficie	Sí	Sí, pero solo en redes de superficie	Sí, pero solo en redes de superficie	Sí, pero sólo en una dirección	MDE, redes de superficie, redes de drenaje pluvial
Acoplamiento 1D-2D	Sí, en 2D	Sí	Sí	Sí	Sí, en dos direcciones	MDE y otros datos topográficos, redes de superficie, redes de drenaje pluvial

Tabla 4. Precisión relativa, requisitos de tiempo de ejecución y escala adecuada de aplicación de los enfoques para el modelado numérico de inundaciones en zonas urbanas (Adaptado de Bulti & Abebe, 2020).

Tipo de Modelo	Precisión para el análisis de inundaciones	Tiempo de ejecución	Escala espacial adecuada de aplicación
	Baja	Un minuto	Macro
RFS (Propagación rápida de flujo)	Alta	Varias horas	Micro
Superficial 1D			
Alcantarillado 1D			
Acoplamiento 1D-1D			
Superficial 2D			
Acoplamiento 1D-2D			

3.5 Modelado hidrológico del proceso Lluvia-Escorrentía

El modelado de lluvia-escorrentía es un proceso importante en cuencas no aforadas que carecen de mediciones directas de los caudales máximos que se pueden presentar en los arroyos o ríos de interés. La información de escorrentía se utiliza como condición de frontera en las modelaciones hidráulicas para determinar la extensión y el alcance del agua en las llanuras aluviales de la zona urbana.

Un modelo de lluvia-escorrentía consiste en un conjunto de ecuaciones que ayudan a estimar la cantidad de lluvia que se convierte en escorrentía en función de varios parámetros utilizados para describir la cuenca hidrográfica (Devi et al., 2015). Este tipo de modelado involucra muchas variables interconectadas y se utiliza para comprender las respuestas de las cuencas, estimar la disponibilidad de agua, generar pronósticos de inundaciones, entre otros (Vaze et al., 2012).

La escorrentía superficial se define como la precipitación que no se infiltra en el suelo y fluye a través de la superficie de la tierra hacia los cuerpos hidrológicos superficiales, como son los arroyos, ríos, lagos u otros reservorios (Perlman, 2019).

La ecuación del balance hídrico rige la escorrentía superficial dentro del ciclo hidrológico, al describir el flujo de agua que entra y sale de un sistema durante un período de tiempo específico. Esta ecuación viene dada como (Sitterson et al., 2017):

$$Q_s = P - ET - \Delta SM - \Delta GW$$

Donde Q_s es la escorrentía superficial, P es la precipitación, ET es la evapotranspiración, ΔSM es el cambio en la humedad del suelo y ΔGW es el cambio en el almacenamiento de agua subterránea.

Los principales factores físicos que afectan la escorrentía son (Perlman, 2019): uso de suelo, vegetación, tipo de suelo, área de drenaje, forma de la cuenca, elevación y topografía (especialmente la pendiente del terreno), patrones de la red de drenaje, embalses en la cuenca que impiden o retrasan el flujo de escorrentía aguas abajo. La variabilidad en las características de los suelos (P. ej. geología, litología, permeabilidad), así como las otras propiedades antes mencionadas afectan la relación entre la lluvia y la escorrentía dentro de una cuenca, por lo que deben considerarse en el modelado hidrológico (Beven, 2012).

3.6 Enfoques para el modelado hidrológico de Lluvia-Escorrentía

Los modelos de lluvia-escorrentía se han clasificado de varias maneras según los criterios de interés para ayudar a describir y analizar sus capacidades, fortalezas y limitaciones. Los principales enfoques son descritos por Knapp et al. (1991), Vaze et al. (2012), Devi et al. (2015), Sitterson et al. (2017), Abdulkareem et al. (2018), Godara y Bruland (2019) y Jehanzahib et al. (2022).

La elección de un enfoque debe basarse en el propósito de la investigación, lo cual implica identificar las prioridades del modelado y las limitaciones de disponibilidad de datos, tiempo y presupuesto para ayudar a reducir las opciones y garantizar que el modelo sea el adecuado (Sitterson et al., 2017). En esta sección se describen de manera general tres tipos de clasificaciones: (1) de eventos y de simulación continua, (2) empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos, y (3) agrupados, semidistribuidos y distribuidos.

3.6.1 Modelos de Eventos y de simulación continua

Los modelos de eventos suelen estimar la escorrentía de un evento de tormenta individual en un periodo relativamente corto con una duración constante que puede variar de minutos a horas, y evalúan un conjunto parcial de los procesos hidrológicos que afectan la cuenca hidrográfica, como

son: la infiltración, el flujo superficial y de canal, y en algunos casos la interceptación y almacenamiento (Knapp et al., 1991). Por otra parte, los modelos de simulación continua operan durante un período sostenido que incluye tanto los eventos de lluvia como las condiciones que ocurren entre tormentas (Knapp et al., 1991).

3.6.2 Modelos empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos

La mayoría de los modelos empíricos son modelos de caja negra, es decir, se sabe poco sobre los procesos internos que controlan cómo se determinan los resultados (Beven, 2012; Sitterson et al., 2017). Como indican Sitterson et al. (2017), la función utilizada para transformar la lluvia en escorrentía es un procedimiento desconocido o sin ninguna referencia a los procesos físicos, como en el caso de los métodos de aprendizaje automático por inteligencia artificial y SCS-CN (acrónimo en inglés de Soil Conservation Services-Curve Number, que significa Servicio de Conservación de Suelos-Número de Curva). Las cuencas hidrográficas no aforadas se modelan mejor adoptando un método empírico debido a la falta de información específica sobre la cuenca (Pechlivanidis et al., 2011).

Los modelos basados en procesos físicos se basan en la comprensión de la física relacionada con los procesos hidrológicos (Vaze et al., 2012). Las leyes y principios físicos generales utilizados incluyen ecuaciones de balance hídrico, conservación de masa y energía, momento y cinemática. Las ecuaciones de Saint Venant, Boussinesq, Darcy y Richards son algunas de las fórmulas adoptadas por estos modelos (Pechlivanidis et al., 2011). Por su parte, los modelos conceptuales se utilizan mejor cuando el tiempo de cálculo es limitado y las características de la cuenca no se analizan en detalle (Sitterson et al., 2017). Las tres categorías de los modelos de lluvia-escorrentía, junto con las fortalezas y debilidades de cada una, se muestran en la Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Comparación de la estructura básica de los modelos empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos (Sitterson et al., 2017).

Tipo de modelo	Empírico	Conceptual	Basado en procesos físicos
Características	Relación no lineal entre las entradas y salidas del modelo, concepto de caja negra	Ecuaciones simplificadas que representan el almacenamiento de agua en una cuenca	Leyes y ecuaciones físicas basadas en respuestas hidrológicas reales
Fortalezas	Se requieren pocos parámetros, puede ser más preciso, poco tiempo de ejecución	Fácil de calibrar, estructura de modelo simple	Incorpora variabilidad espacial y temporal, escala muy fina

Debilidades	Físicamente no existe conexión directa con la cuenca, distorsión de los datos de entrada	No considera la variabilidad espacial dentro de la cuenca	Requiere un mayor número de parámetros y calibración, aplica a condiciones específicas del sitio
Uso recomendado	En cuencas no aforadas donde sólo se requiere la escorrentía como dato de salida	Cuando el tiempo computacional de ejecución o los datos son limitados	Cuando hay una gran disponibilidad de datos a escala pequeña
Ejemplos	Número de curva SCS-CN, Redes neuronales artificiales	HSPF, TOPMODEL, HBV	MIKE-SHE, KINEROS, VIC, PRMS

Tabla 6. Descripción detallada de los modelos conceptuales, basados en procesos físicos y empíricos (Adaptado de Jehanzahib et al., 2022).

Categoría	Características	Modelos	Fortalezas	Debilidades
Conceptual	1. Modelo de caja gris o paramétrico, que incluye ecuaciones semi-empíricas con bases físicas	HBV, GR2M, ABCD, TANK, GR4J, SM	1. Modelo de estructura simple	1. No considera la variabilidad espacial dentro de la cuenca
	2. Parámetros derivados de datos de campo y calibración		2. Fácil de calibrar con pocos datos	2. No recomendado para cuencas extensas
	3. Requiere de datos hidrometeorológicos, pero es simple y fácil de implementar en computadoras		3. Requiere menos tiempo de ejecución computacional	
	4. La calibración involucra ajuste de curvas, lo que dificulta la interpretación física			
Basado en procesos físicos	1. Modelo de caja blanca, se basa en la evaluación de parámetros que describen características físicas	TOPMODEL, SWMM, HEC-HMS, WATFLOOD	1. Incorpora la variabilidad espacial y temporal de la cuenca	1. Sufre de problemas relacionados con la escala pequeña de aplicación
	2. Estructura compleja que requiere mucho más habilidades humanas y capacidades computacionales		2. Utiliza una escala muy fina, que captura un mayor número de detalles	2. Se requieren mucho más parámetros para la calibración
	3. Requiere datos de las condiciones iniciales y la morfología de la cuenca		3. Válido en un amplio rango de situaciones	3. Aplicable a las condiciones específicas del sitio
	4. Representa diferentes procesos hidrológicos mediante las ecuaciones de masa, momento y conservación de la energía			4. Mayor tiempo de ejecución y requerimientos computacionales
Empírico	1. Modelo basado en datos, involucra ecuaciones matemáticas cuyo valor se deriva de las series de tiempo disponibles	SCS-CN, ANN, UH	1. Requiere pocos datos y parámetros	1. No hay una conexión directa con la cuenca física
	2. Poca consideración de las características y procesos físicos del sistema		2. Se puede utilizar en cuencas no aforadas	2. Al ser un modelo de caja negra, hay distorsión de los datos de entrada

	3. No se puede aplicar a otras cuencas			
	4. Válido dentro de los límites del dominio del modelo dado			

3.6.3 Modelos agrupados, semidistribuidos y distribuidos

La estructura espacial de los procesos de una cuenca en los modelos de lluvia-escorrentía se puede clasificar como agrupada, semidistribuida y totalmente distribuida. La Figura 3 muestra de manera gráfica la estructura espacial de acuerdo con el tipo de modelo. En el modelo semidistribuido de la Figura 3B, la escorrentía se calcula para cada subcuenca en el punto de salida representado por los puntos negros. Por su parte, en el modelo distribuido de la Figura 3C se calcula la escorrentía para cada celda de la cuadrícula. Finalmente, en el modelo agrupado de la Figura 3A se calcula un valor de escorrentía para toda la cuenca en el punto de salida del río representado por el punto negro (Sitterson et al., 2017).

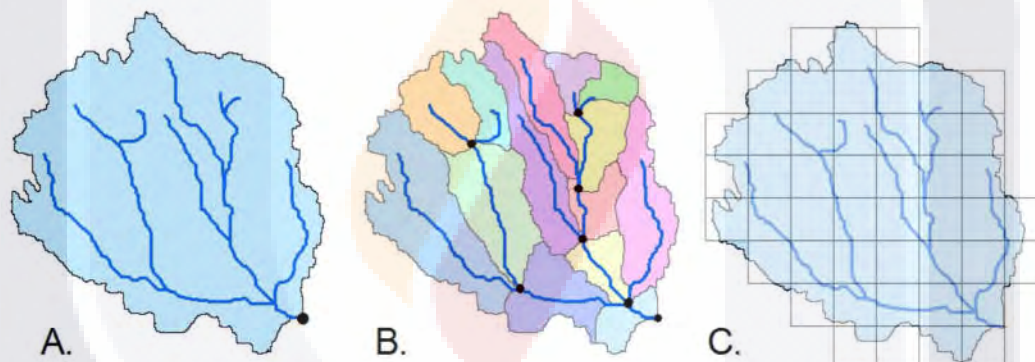


Figura 3. Visualización de la estructura espacial en los modelos de lluvia-escorrentía. A: Modelo agrupado, B: Modelo semidistribuido por subcuencas, C: Modelo distribuido por celdas de la cuadrícula (Tomado de Sitterson et al., 2017).

Por su parte, en la Tabla 7 se muestra una comparación de estos modelos, indicando sus fortalezas y limitaciones. El tipo de estructura espacial influye en cómo se genera y se dirige la escorrentía a lo largo de la cuenca.

Tabla 7. Comparación de los modelos de lluvia-escorrentía con base en su estructura espacial (Adaptado de Sitterson et al., 2017).

Tipo de Modelo	Agrupado	Semi-Distribuido	Distribuido
Características	No considera la variabilidad espacial; toda la cuenca es modelada como una unidad	Series de parámetros agrupados y distribuidos	Sí considera la variabilidad espacial
Entradas	Todos los datos promediados por cuenca	Utiliza tanto datos promedio como datos específicos de cada subcuenca	Todos los datos específicos por cada celda
Fortalezas	Tiempo computacional rápido, bueno para simular condiciones promedio	Representa características importantes en la cuenca	Físicamente relacionado con los procesos hidrológicos
Debilidades	Bastantes suposiciones, pérdida de resolución espacial, no recomendado para áreas extensas	Promedia datos obtenidos en cada subcuenca, por lo que también pierde resolución espacial	Mayor cantidad de datos, alto requerimiento computacional y tiempo de ejecución
Ejemplos	Modelos empíricos y conceptuales, aprendizaje por computadora	Modelos conceptuales y algunos modelos físicos (TOPMODEL, SWAT, HEC-HMS)	Modelos físicamente distribuidos (MIKE-SHE, VELMA)

CAPÍTULO IV: Marco Metodológico

El marco metodológico está dividido en 3 secciones principales, en las cuales se muestran metodologías para la obtención de datos que puedan ser utilizados en la modelación numérica, así como los componentes principales de cada modelo numérico. La primera sección corresponde a la modelación de sistemas de infiltración de agua, particularmente a un sistema de concreto permeable. La segunda sección trata de la modelación hidrológica, que tiene como objetivo determinar las escorrentías en la cuenca de estudio a partir de registros pluviométricos. Por último, la tercera sección es la modelación hidráulica, donde se determina el alcance del agua y los sedimentos durante las inundaciones.

4.1 Área de Estudio

Las zonas más vulnerables a afectaciones por inundaciones en la ciudad de Aguascalientes son las que se muestran en la Tabla 8. Esta vulnerabilidad se debe principalmente a que la infraestructura de drenaje existente no es capaz de desalojar el exceso de agua durante eventos fuertes de precipitación, así como también a la expansión urbana en zonas poco adecuadas cercanas a ríos o arroyos (Instituto Municipal de Planeación [IMPLAN], 2015).

Tabla 8. Zonas urbanas de la ciudad de Aguascalientes que son vulnerables a inundaciones (Tomado de IMPLAN, 2015).

No.	Fraccionamiento	Calle o Avenida
1	San Luis	Av. Adolfo López Mateos
2	Mujeres Ilustres	Av. De la Convención de 1914
3	Periodistas	Alameda
4	Cumbres II	Av. Aguascalientes
5	Luis Ortega Douglas	Av. Universidad
6	Residencial del Parque	Wasco
7	Jardines de Casa Blanca	Av. Alameda (Paso a desnivel)
8	Progreso	General
9	Los Pericos	General
10	Benito Palomino Dena	General
11	Refugio Esparza Reyes	General
12	Héroes	General
13	Zona Centro	General
14	Constitución	General
15	Progreso	General
16	Norias de Ojocaliente	General
17	Fidel Velázquez	General

18	Los Sauces	General
----	------------	---------

De estas zonas urbanas, se eligió la número 14 que corresponde a la colonia Constitución y sus alrededores, debido a que la población de esta zona se ha visto constantemente afectada por los desbordamientos de los arroyos de La Hacienda y el Molino, y las autoridades están tratando de implementar proyectos que ayuden a resolver esta problemática (Ayuntamiento de Aguascalientes, 2018; Busson, 2023). Considerando que las inundaciones en esta zona son provocadas por precipitaciones extremas, se adoptó un criterio hidrológico para delimitar la cuenca hidrográfica e identificar los principales afluentes que aportan escurrimientos a esta zona. Para ello, se utilizó el programa de código abierto QGIS (acrónimo en inglés de Quantum Geographic Information System, que significa Sistema de Información Geográfica Quantum) y la metodología propuesta por Kwast y Menke (2020). Los datos topográficos para delinear la cuenca se obtuvieron del INEGI, particularmente del DEM LiDAR con resolución espacial de 5 metros. DEM es el acrónimo de Digital Elevation Model, que significa modelo digital de elevaciones.

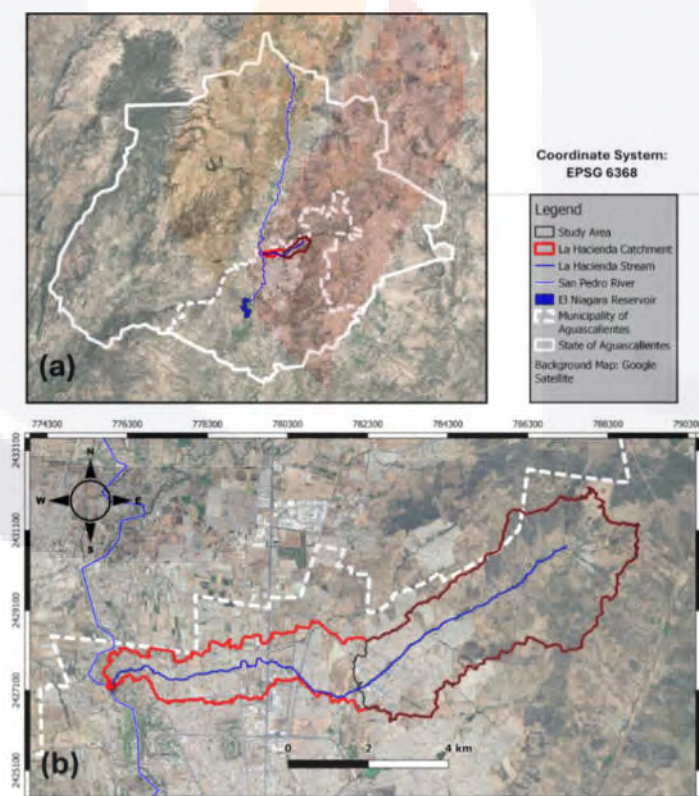


Figura 4. (a) Mapa del Estado de Aguascalientes (b) Ubicación de la cuenca La Hacienda junto con la red hidrográfica del cauce principal.

La ubicación y la forma de la cuenca hidrográfica de estudio se muestran en la Figura 4. Se trata de una cuenca pequeña elongada con una extensión aproximada de 26 km². Su punto de salida es el río San Pedro. Este río es el afluente principal del estado de Aguascalientes, mismo que fluye de norte a sur a través de la ciudad de Aguascalientes y forma una red hidrológica que sirve como drenaje natural de las aguas pluviales y residuales (Ortiz, 2024; Reyes-Cedeño et al., 2024). El arroyo principal de la cuenca es el arroyo La Hacienda, el cual se caracteriza por ser un afluente de tipo temporal que permanece seco la mayor parte del año y presenta condiciones de flujo debido a eventos de precipitación. Un rasgo importante de esta cuenca es que no está aforada, por lo que no existen registros que aporten información hidráulica de los caudales que se presentan en el arroyo principal durante los eventos de lluvia o de la cantidad de sedimentos transportados. Esto implica tener que realizar un análisis hidrológico para obtener esta información.

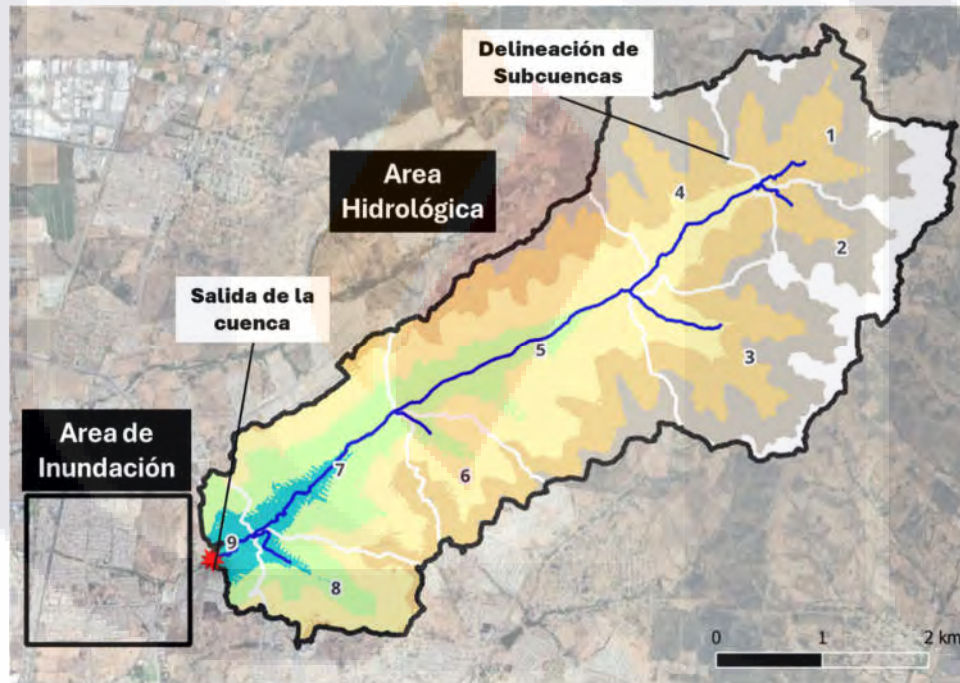


Figura 5. Área de estudio de la zona donde se realizan las simulaciones numéricas hidráulicas (Área de inundación) e hidrológicas (Área hidrológica) junto con la red hidrográfica y las subcuencas.

El enfoque más utilizado y recomendado para la modelación de inundaciones en cuencas con extensión menor a 100 km² es el hidrodinámico bidimensional (Bulti & Abebe, 2020; Hill et al., 2023). Este enfoque es el que más se ajusta a los objetivos planteados de esta tesis. Para definir correctamente el área de estudio, fue necesario identificar las zonas específicas de la cuenca donde

se realizaron tanto las modelaciones hidrológicas como las modelaciones hidráulicas, tal y como se muestra en la Figura 5. El análisis hidrológico se realizó aguas arriba de la zona afectada por las inundaciones, y para ello fue necesario elegir una ubicación específica del arroyo principal (punto de análisis) para poder determinar los caudales máximos de inundación. Seleccionar este punto de análisis permitió identificar y dividir de manera adecuada el área de estudio del modelo numérico de inundaciones. Las extensiones del área hidráulica e hidrológica son de 2.15 km² y 18.17 km², respectivamente.

Debe recordarse que las primeras cuatro etapas de un modelo de inundaciones, de acuerdo con Kumar et al. (2023) son: (1) Definir el área de estudio, (2) recolección de datos, (3) modelación hidrológica y (4) modelación hidráulica. La Figura 6 muestra un tramo del arroyo La Hacienda donde se realizó una evaluación de técnicas de fotogrametría y GIS para la obtención de los datos topográficos y de uso de suelo de alta resolución.



Figura 6. Localización del área de estudio. La alineación con vegetación muestra la ubicación del tramo del arroyo La Hacienda (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

4.2 Obtención de datos para la modelación de sistemas de infiltración

4.2.1 Permeabilidad y Porosidad

En esta sección se muestra el procedimiento experimental que se siguió para obtener datos de porosidad y permeabilidad de un sistema de infiltración conocido como concreto permeable.

Primero, se prepararon probetas de concreto permeable utilizando los materiales básicos cemento Portland y agregados de arena y grava con formas subangulares. Estos agregados se prepararon utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS), lo que dio como resultado una mezcla de grava y arena bien gradada con coeficientes de uniformidad y curvatura de 4,36 y 1,98, respectivamente, como se muestra en la Figura 7. Las relaciones en peso de agregado-cemento y agua-cemento utilizadas en la mezcla dieron como resultado 4:1 y 0,33, respectivamente. En general, las muestras de concreto permeable se prepararon para los ensayos de acuerdo con las especificaciones ACI 522R (2010) y ASTM C192 (2000).

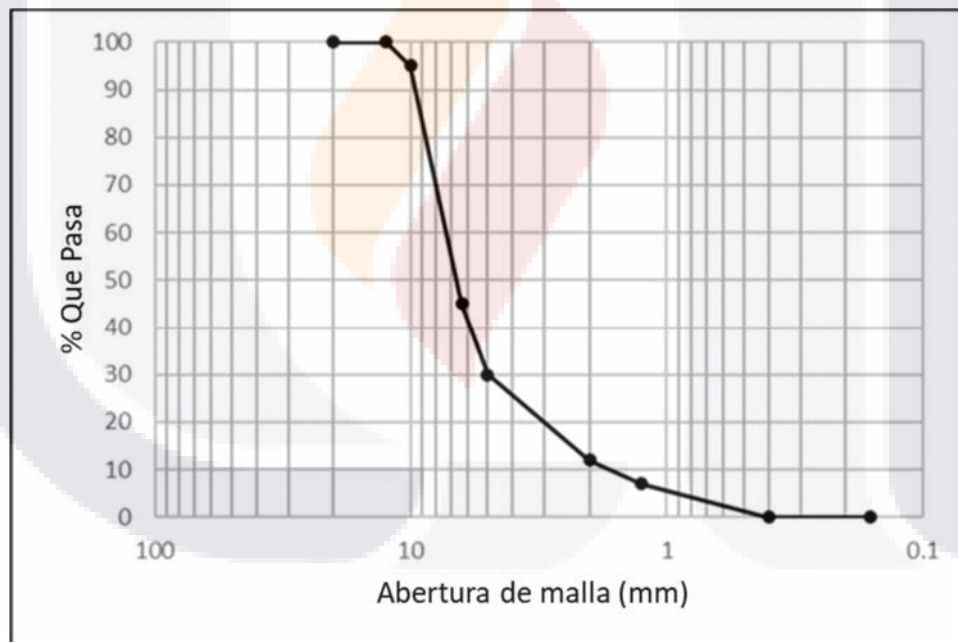


Figura 7. Curva granulométrica de la mezcla de agregados utilizada en la preparación de muestras de concreto permeable (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

Se evaluaron parámetros básicos en los materiales utilizados en las muestras, tales como contenido de humedad y densidad de los agregados, previo a la prueba. El contenido de humedad de una muestra representativa de agregados se determinó y ajustó unos minutos antes de que se preparara

la muestra de concreto permeable, mientras que la densidad y el porcentaje de absorción de los agregados utilizados en el muestreo resultaron de 2395 kg/m³ y 3.77 %, respectivamente, de acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM C127 (2007). Luego del curado, que es un proceso habitual para asegurar que cada tipo de concreto alcance sus máximas propiedades de dureza y durabilidad, las muestras fueron cortadas para obtener las dimensiones deseadas. En total, se utilizó en las pruebas un conjunto de 8 especímenes cilíndricos, de 100 mm de diámetro y 160 mm de altura, como se muestra en la Figura 8.

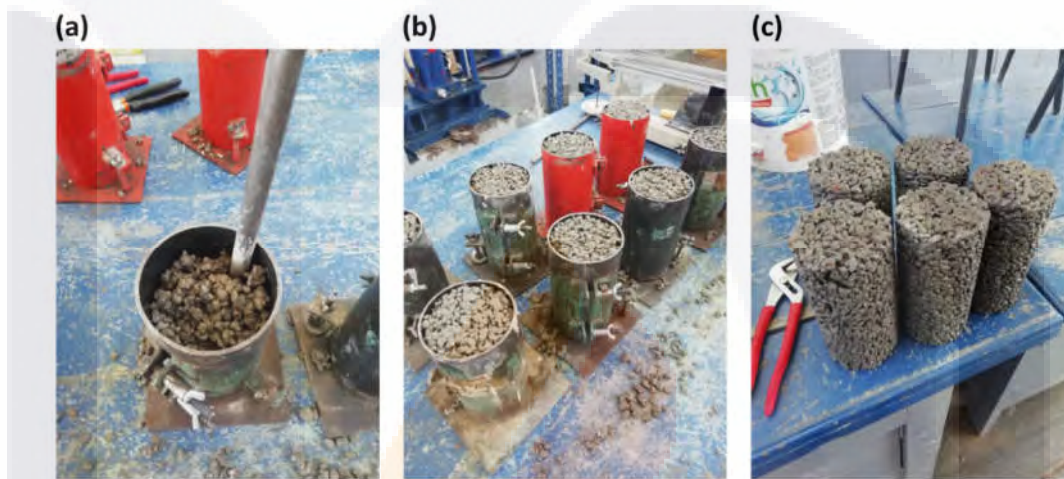


Figura 8. Procedimientos de laboratorio para la obtención de muestras de concreto permeable. La figura (a) muestra una etapa de preparación de la muestra, (b) muestra el conjunto de muestras en moldes para la prueba y (c) muestra algunas de las muestras finales antes de la prueba de permeabilidad (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

Para obtener la porosidad de las muestras de concreto permeable, aplicamos el método de diferencia de masa, siguiendo la norma ASTM C140 [25]. La fórmula viene dada por la Ecuación 1:

$$n = \left[1 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w V} \right] * 100 \quad (1)$$

Donde n es el porcentaje de porosidad, m_1 es la masa de la muestra sumergida en agua (gr), m_2 es la masa de la muestra seca (gr), V es el volumen aparente de la muestra (cm³) y ρ_w es la densidad del agua (gr/cm³).

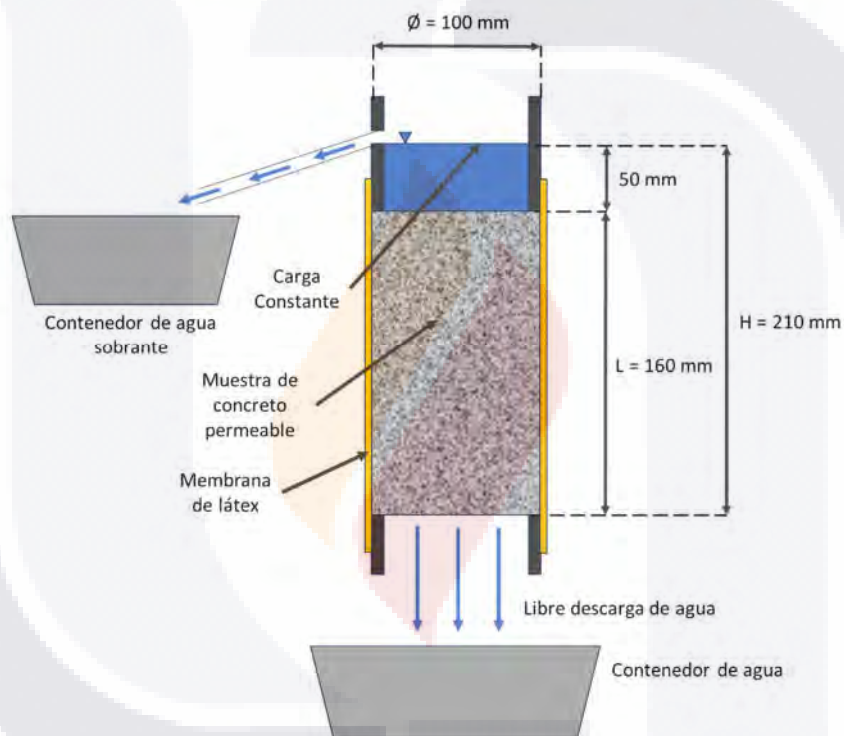


Figura 9. Método de prueba de permeabilidad para muestras de concreto permeable y esquema de permeámetro de carga constante (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

Para obtener la permeabilidad vertical de las muestras de concreto permeable, se adaptó un permeámetro de carga constante a las dimensiones de las muestras. Parte de esta adaptación incluyó asegurar el flujo de agua vertical libre durante las pruebas, lo que se logró confinando lateralmente las muestras de concreto permeable con membranas de látex Humboldt de 75 mm. El agua que fluía de las muestras se recogió en un recipiente debajo de la muestra para poder medir el

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

volumen de agua que fluía para cálculos posteriores. La Figura 9 muestra el procedimiento de prueba y un esquema del permeámetro utilizado.

La permeabilidad de las pruebas se estimó finalmente utilizando la Ecuación 2, que se basa en la ley de Darcy (Das & Sobhan, 2014).

$$k = \frac{Q L}{A H t} \quad (2)$$

Donde Q es el caudal, t es el tiempo en segundos que el volumen de agua necesita para pasar a través del área de la sección transversal A de la muestra de concreto permeable. L es la longitud de la muestra y H es el diferencial de carga hidráulica. Como parte de los cálculos, se utilizó una altura de agua constante de 50 mm por encima de la superficie libre de las muestras de concreto permeable, ya que los valores pequeños de carga constante son aplicables para la ley de Darcy y representan condiciones realistas de infiltración de agua en el concreto permeable durante una tormenta (Andrés-Valeri et al., 2020).

4.3 Modelación de sistemas de infiltración

Se aplicaron simulaciones numéricas en COMSOL a las muestras de concreto permeable para representar y analizar escenarios reales de colmatación en diferentes condiciones de infiltración agua-sólido. Para ello, el software COMSOL incluye dos módulos, Particle Tracking y Laminar Flow, que permiten simular las trayectorias de movimiento y la interacción de partículas sólidas a través de materiales porosos como el concreto permeable. Para este trabajo, se simularon las trayectorias de partículas como arenas que se mueven a través del concreto permeable con base en las leyes físicas que influyen en el movimiento de los sólidos. Por ejemplo, el flujo laminar para fluidos monofásicos incompresibles, la fuerza de arrastre y la gravedad, entre otras, sin embargo, las fuerzas de fricción se han omitido de las simulaciones porque las partículas sólidas que ingresan al concreto permeable se simulan como si fueran arrastradas por un flujo de agua, lo que en cambio puede reducir la fricción.

Para la configuración del modelo, utilizamos modelos bidimensionales con las dimensiones de las muestras reales utilizadas en la parte experimental, que son 100 mm de ancho y 160 mm de alto, con diámetros de poro que varían de 2 a 8 mm. La estructura de poros incorporada a las muestras simuladas, basada numéricamente en la porosidad de la parte experimental, se muestra en la Figura

10a y consiste en una red de poros no lineal sintética con una geometría obtenida a partir de Image J v.1.54, un software para el procesamiento de imágenes digitales.

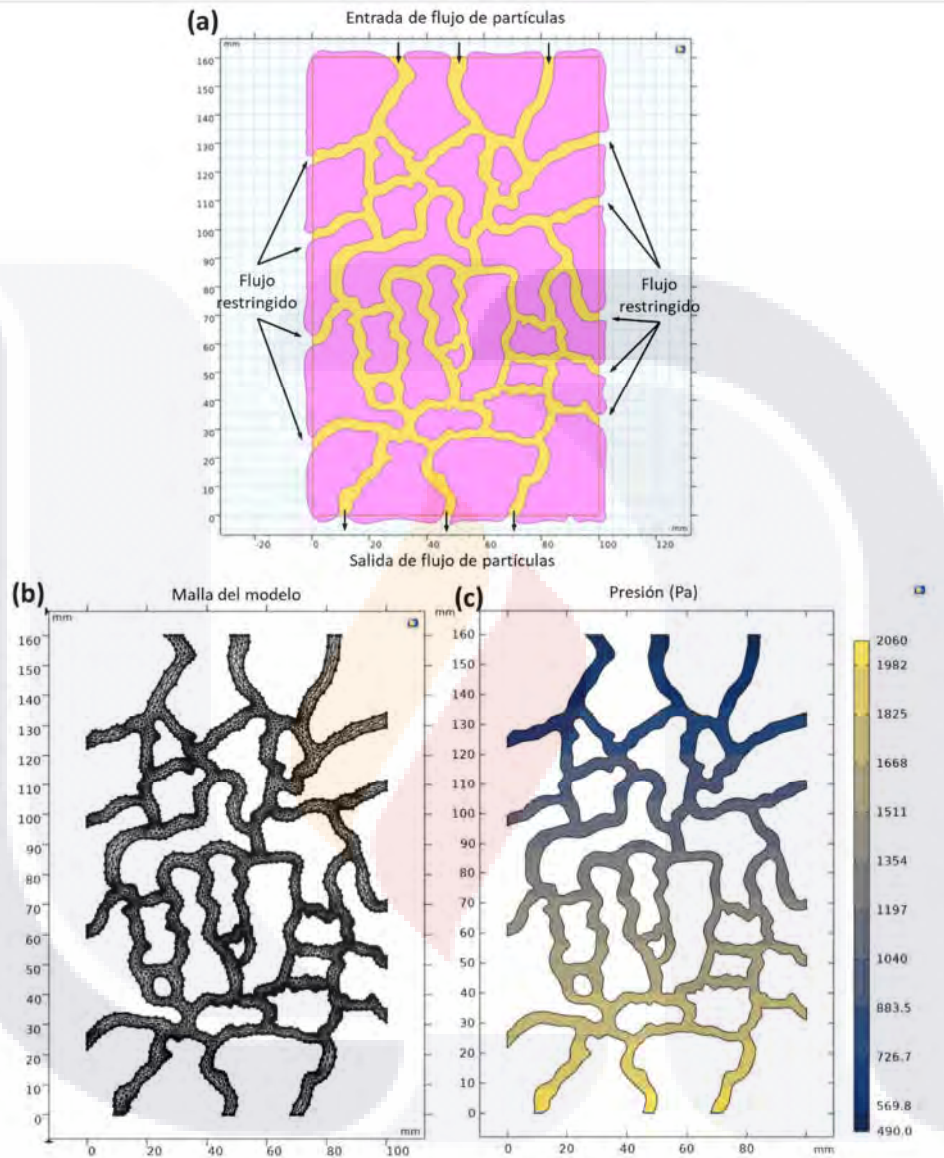


Figura 10. Dominio del modelo y algunas de las principales características utilizadas en las simulaciones. a) Modelo conceptual con la estructura porosa, b) Mallado utilizado en la red porosa, y c) variación de la presión relativa en los fluidos porosos (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

Para el correcto desempeño del modelo numérico, las entradas utilizadas en las simulaciones, además de la porosidad y la permeabilidad, fueron la presión relativa de entrada, la temperatura, la

velocidad de filtración del agua, el diámetro de las partículas y el tiempo de liberación de las partículas. Las salidas de las simulaciones para el análisis posterior involucraron la posición, la velocidad y la trayectoria de las partículas. Se incluyeron dos condiciones de contorno principales: flujo lateral restringido que representa el efecto de la membrana elástica, y flujo en la parte superior e inferior del modelo, simulando la entrada y salida de agua y partículas en las muestras de concreto permeable.

Otra característica relevante en las simulaciones es la inserción de la malla gruesa predefinida representada en la Figura 10b, que permitió reducir el tiempo de las simulaciones. Además, se simuló una presión relativa de 490 Pascales en la parte superior del modelo, simulando los 50 mm de altura del agua utilizados por encima de las muestras durante los experimentos. Esta presión relativa se configuró para que aumentara linealmente con la profundidad durante las simulaciones hasta alcanzar un valor de 2060 Pascales en la parte inferior del modelo, como se muestra en la Figura 10c.

La selección de los materiales de obstrucción fue clave en las simulaciones ya que este proceso depende principalmente de los sólidos atrapados en los poros. Para ello, el módulo de seguimiento de partículas para flujo de fluidos del software COMSOL proporciona algunas opciones para definir el tamaño y número de partículas sólidas, así como la forma en que las partículas ingresan al dominio del modelo (ACI 522R, 2010).

Con base en esto, los sólidos de obstrucción utilizados en las simulaciones fueron equivalentes en tamaño a partículas de arena. Aproximadamente 20 g de partículas de obstrucción se utilizaron en cada simulación, separados en tres tipos de materiales, como se especifica en la Tabla 9. Las partículas sólidas con diámetros menores al del material III no se consideraron en las simulaciones debido al tiempo excesivo necesario para completarlas. Para el análisis de los resultados en esta parte de la investigación, las simulaciones se agruparon y organizaron de acuerdo con los recursos computacionales disponibles y los resultados esperados. Las partículas sólidas con diámetros menores al del material III no se consideraron en las simulaciones debido al tiempo excesivo requerido. Para el análisis de los resultados en esta parte de la investigación, las simulaciones se agruparon y organizaron de acuerdo con los recursos computacionales disponibles y los resultados esperados.

Tabla 9. Características de los materiales de obstrucción granular en las simulaciones numéricas. Para estimar el número y la masa de partículas sólidas, se consideró una forma completamente esférica y una densidad de 2650 kg/m³, como lo informaron Das y Sobhan [26] para partículas sólidas de arena de cuarzo.

Material de obstrucción	Diámetro de partículas (mm)	Número de partículas	Masa total de partículas (g)	Masa total de partículas (%)
Material I 2.36-1.18 mm Arena muy gruesa	2.36	156	2.8451	14.2
	2.16	156	2.1814	10.9
	2	312	3.4633	17.3
	1.8	468	3.7871	18.9
	1.6	468	2.6598	13.3
	1.4	780	2.9698	14.8
	1.25	780	2.1138	10.6
Total		3120	20.0203	100.0
Material II 1.18-0.6 mm Arena gruesa	1.18	1248	2.8451	13.9
	1.12	1248	2.4328	11.9
	1	2496	3.4633	16.9
	0.9	3744	3.7871	18.5
	0.8	3744	2.6598	13.0
	0.71	6240	3.0989	15.2
	0.63	6240	2.1650	10.6
Total		24960	20.4520	100.0
Material III 0.6-0.3 mm Arena media	0.6	9984	2.9923	14.5
	0.56	9984	2.4328	11.8
	0.5	19968	3.4633	16.8
	0.45	29952	3.7871	18.4
	0.4	29952	2.6598	12.9
	0.355	49920	3.0989	15.0
	0.315	49920	2.1650	10.5
Total		199680	20.5992	100.0

Se realizaron un total de 6 simulaciones considerando 2 escenarios diferentes, en función del parámetro de velocidad de filtración (v_s), el cual se determinó midiendo el volumen de agua que pasó por la sección transversal de cada muestra en aproximadamente 20 segundos. La ecuación 3 permite estimar la velocidad de filtración (Das & Sobhan, 2014).

$$v_s = \frac{Q}{A t n} \quad (3)$$

Donde Q es el volumen de agua, A es el área de la sección transversal de la muestra, t es el tiempo y n es la porosidad de la muestra. Con los datos de la parte experimental se obtuvo un valor de 8.98 mm/s para v_s y se utilizó en el primer escenario. Sin embargo, en el segundo escenario se utilizó un valor de 2.43 mm/s, correspondiente a una permeabilidad de 0.5 mm/s. Este valor de permeabilidad es el mínimo recomendado para asegurar el desempeño hidráulico de un pavimento de concreto

permeable según ACI 522R (2010) y se estableció en respuesta a la reducción permanente real de la porosidad efectiva y la permeabilidad que experimenta el concreto permeable debido a los poros no restaurados después del mantenimiento (Sandoval et al., 2020). La información numérica de la Tabla 10 muestra los parámetros de modelado utilizados para los diferentes escenarios y simulaciones.

Para obtener mejores resultados en el análisis numérico, cada uno de los dos escenarios presenta 6 simulaciones, y cada una de ellas se divide en 4 pasos: el paso 1 corresponde al tiempo necesario para liberar todas las partículas en la muestra; el paso 2 indica el tiempo en que las partículas llegan a la salida de la muestra en al menos 1 de los poros; el paso 3 indica el tiempo en que las partículas llegan a la salida de la muestra en todos los poros (3 poros en total); finalmente, el paso 4 corresponde al tiempo total de la simulación, entendido como el tiempo en que todas las partículas dejaron de moverse en la simulación.

Tabla 10. Parámetros de modelado utilizados en las simulaciones. El tiempo de liberación de partículas corresponde al período en el que los materiales obstructivos ingresan al modelo desde la parte superior del mismo. Dos segundos después de la liberación de partículas, permitiendo primero que se establezca el flujo laminar de agua dentro de los poros.

Escenario	Simulación	Velocidad de filtración (mm/s)	Número de partículas liberadas	Tiempo de liberación de partículas	Material de obstrucción
1	1	8.98	3120	2 to 12	Material I
	2	8.98	24960	2 to 12	Material II
	3	8.98	199680	2 to 12	Material III
2	4	2.43	3120	2 to 32	Material I
	5	2.43	24960	2 to 32	Material II
	6	2.43	199680	2 to 32	Material III

Para asegurar el correcto desempeño de las simulaciones, el tiempo de liberación de partículas se dividió en 2 períodos iguales, cada uno de los cuales liberó 20 partículas. Así, para el escenario 1 el tiempo de liberación de partículas para cada período fue de 10 segundos, mientras que para el escenario 2 este tiempo aumentó a 30 segundos. Cada simulación se consideró completa cuando no se observó movimiento de partículas sólidas, o cuando no se registró salida de estas de la muestra simulada. Para estimar el porcentaje de partículas sólidas atrapadas dentro de la muestra de concreto permeable en cada simulación, COMSOL permitió colocar un contador de partículas virtual en la parte inferior del modelo.

4.4 Obtención de datos para la modelación hidrológica

En esta sección se muestran los procedimientos que se siguieron o propusieron para obtener datos para la modelación hidrológica del proceso de lluvia-escorrentía en el área de estudio.

4.4.1 Datos hidrológicos

El área hidrológica se subdividió en 9 subcuencas y el arroyo principal se subdividió en 4 tramos, tal y como se muestra en la Figura 11.

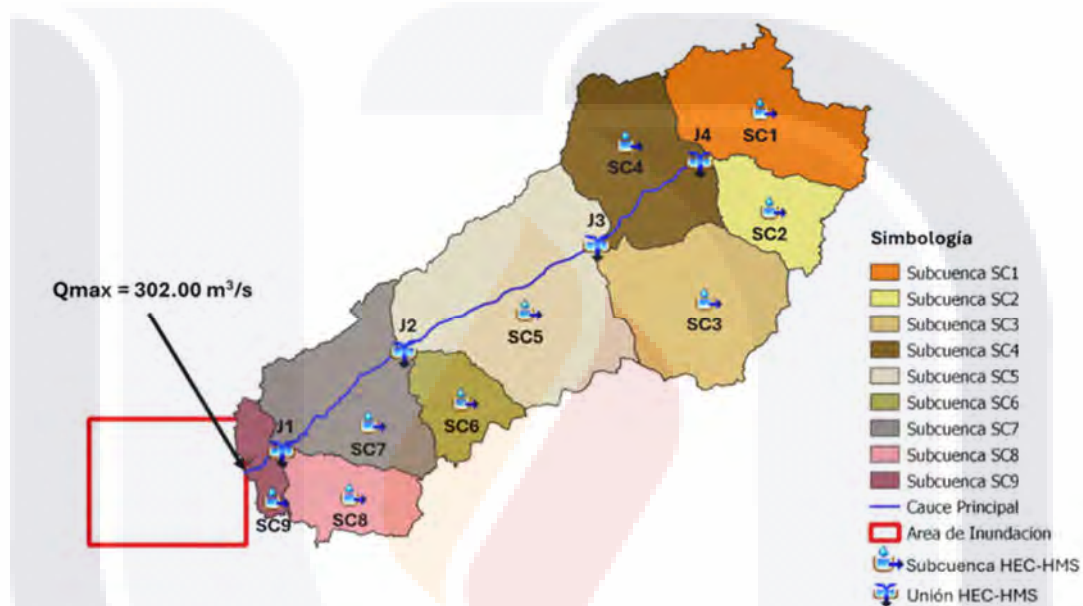


Figura 11. Subdivisión del área hidrológica en subcuencas. Las uniones se refieren a los puntos del cauce principal donde las salidas de 2 o más subcuencas convergen.

La estimación de los tiempos de concentración y retardo es indispensable para llevar a cabo un análisis hidrológico (United States Department of Agriculture [USDA], 1986). Para calcular los tiempos de concentración de cada subcuenca se utilizó la fórmula de Kirpich, ya que otras fórmulas aplicables como la ecuación de retardo SCS son más aptas cuando las áreas de la cuenca y de los cauces están completamente pavimentadas (Chow et al., 1988). Además, la fórmula de Kirpich se ha aplicado en México en cuencas urbanas y naturales no aforadas con buenos resultados (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015). Esta fórmula se basa en el supuesto de que la velocidad del flujo en los canales aumenta con el aumento de la pendiente, y se puede calcular con la Ecuación 4 de la siguiente manera (Campos-Aranda 2010; Chow et al., 1988):

$$T_c = 0.0195 L^{0.77} S^{-0.385} \quad (4)$$

Donde T_c es el tiempo de concentración en minutos, L es la longitud del cauce principal en metros y S es la pendiente, misma que se obtiene dividiendo la diferencia de elevación en metros entre el punto más alejado y el punto de salida de la cuenca entre L . Por otra parte, el tiempo de retardo es igual a 0.6 veces el tiempo de concentración (Mockus, 1961). El tiempo de concentración se refiere al lapso que tarda en viajar la lluvia de una tormenta desde el punto más alejado de una cuenca hasta la salida de esta, mientras que el tiempo de retardo es el lapso transcurrido entre el pico de lluvia de una tormenta y el caudal máximo a la salida de una cuenca (USDA, 1986; National Resources Conservation Service [NRCS], 2010). El área y los tiempos de concentración y retardo se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características geomorfológicas e hidrológicas de las subcuencas.

Subcuenca	Área (km ²)	Longitud del cauce ppal. (m)	Elevación media (msnm)	Elevación del punto de salida (msnm)	Tiempo de concentración (min)	Tiempo de retardo (min)
SC1	2.383	2759	2016.23	1981.11	64.3	38.6
SC2	1.177	2500	2019.16	1981.11	57.3	34.4
SC3	2.708	2967	2008.31	1966.33	67.7	40.6
SC4	2.397	3199	1999.24	1966.33	69.6	41.8
SC5	4.440	4601	1981.12	1941.83	84.0	50.4
SC6	0.973	2108	1981.33	1941.83	34.3	20.6
SC7	2.470	3474	1963.82	1927.66	36.2	21.7
SC8	1.165	2715	1967.13	1927.66	41.5	24.9
SC9	0.484	1625	1945.44	1920.44	22.1	13.3
	18.197					

4.4.2 Uso de suelo

La cuenca de estudio está compuesta de zonas urbanas, rurales y agrícolas. Considerando que el análisis hidrológico se realizó utilizando el método empírico SCS-CN, se requiere de información sobre la cobertura de suelo para poder calcular los números de curva. Actualmente, no existen datos con resolución espacial adecuada sobre la cobertura de suelo en la cuenca, por lo que se utilizó una técnica alternativa, tal y como se describe en los siguientes párrafos.

Primero, se identificaron las coberturas de suelo que existen en la cuenca, utilizando el programa QGIS y el mapa base de Google Satélite. Es importante mencionar que las coberturas deben

corresponder a las enlistadas por el método SCS-CN, ya que de lo contrario no se podrán asignar los números de curva. La Tabla 12 indica los tipos de cobertura de suelo que se lograron identificar en la cuenca y que tienen asociado un valor de número de curva (USDA, 1986; NRCS, 2004). El grupo hidrológico del suelo se describe de manera más detallada en la siguiente sección.

Tabla 12. Valores del número de curva para áreas agrícolas, urbanas y rurales en función del tipo de cobertura y el grupo hidrológico del suelo. Adaptado de USDA (1986) y NRCS (2004).

		CN de acuerdo con el grupo hidrológico de suelo			
Tipo de Cobertura	Condición hidrológica	A	B	C	D
Tierras agrícolas					
Barbecho - Cobertura de residuos de cultivos (al menos el 5% de la superficie durante todo el año)	Buena (los factores fomentan una infiltración promedio o mejor que el promedio)	74	83	88	90
Matorrales. Área rural con crecimiento salvaje de matorrales, maleza y pasto, siendo los matorrales el principal elemento	Pobre (menos del 30% de cobertura de suelo)	48	67	77	83
Granjas: incluye edificios, caminos, entradas para vehículos y lotes circundantes		59	74	82	86
Áreas Urbanas (en desarrollo)					
Áreas recién niveladas (sólo áreas permeables, sin vegetación)		77	86	91	94
Áreas Urbanas (completamente desarrolladas con vegetación establecida)					
Áreas impermeables: estacionamientos, calles y caminos pavimentados, techos, entradas de vehículos, etc.		98	98	98	98
Espacios abiertos (lotes con césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.)	Aceptable (cobertura de césped del 50% al 75%)	49	69	79	84
Distritos residenciales por tamaño de lote promedio: 1/8 de acre o menos (casas adosadas)		77	85	90	92
Distritos urbanos: comerciales y de negocios		89	92	94	95

Posteriormente se generó el mapa directamente en el programa QGIS. Para ello, crearon capas para cada cobertura de suelo, y se delinearon manualmente los elementos de cada capa en cada subcuenca utilizando las herramientas disponibles dentro de dicho programa. Este paso requirió

algunas horas, pero se obtuvo un delineado detallado de los elementos de la cobertura de suelo de la cuenca, tal y como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Delineado de los elementos de cada capa de cobertura de suelo en QGIS. La línea negra corresponde a la división de subcuencas.

4.4.3 Permeabilidad del suelo

Además de los datos de uso y cobertura de suelo, se requiere conocer también el grupo hidrológico del suelo en la cuenca o subcuencas para determinar los números de curva del método SCS-CN, tal y como se indica en la Tabla 12. El grupo hidrológico del suelo está determinado por la capa de suelo que transmite agua con la permeabilidad más baja, sin importar si esta capa se encuentra en un horizonte superior o inferior del suelo (NRCS, 2009). Si se conoce la conductividad hidráulica saturada del suelo, se puede determinar el grupo hidrológico del suelo en cualquier parte de la cuenca, tal y como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Criterios de asignación del grupo hidrológico del suelo en función de la conductividad hidráulica saturada (Tomado de NRCS, 2009).

Grupo hidrológico	Textura del suelo	Conductividad hidráulica saturada Ksat (mm/hr)
A	Texturas de grava o arena que contienen menos del 10 % de arcilla y más del 90 % de arena o grava	> 36.07
B	Texturas de tipo franco arenoso o arena franca que tienen entre 10 y 20 % de arcilla y entre 50 y 90 % de arena	14.48 a 36.07

C	Texturas franca, franca limosa, franca arenosa arcillosa, franca arcillosa y franca limosa arcillosa que incluyen entre 20 y 40 % de arcilla y menos de un 50 % de arena	1.52 a 14.48
D	Texturas arcillosas con más del 40 % de arcilla y menos del 50 % de arena	< 1.52



Figura 13. Permeámetro tipo Pask estándar durante una prueba de permeabilidad.

La permeabilidad del suelo se determinó en varios puntos de la cuenca mediante un permeámetro tipo Pask estándar, tal y como se muestra en la Figura 13. Este dispositivo permite obtener el parámetro K_{fs} , es decir, la conductividad hidráulica saturada in situ, aplicando la técnica del permeámetro de carga constante (Elrick & Reynolds, 1986; Reynolds, 1993). A medida que el agua fluye desde el reservorio del permeámetro hacia el suelo durante una prueba, se establece un bulbo

saturado que con el tiempo se va acercando a un caudal casi constante y, una vez que se alcanza esta condición, se puede determinar la tasa de descenso del agua en el reservorio para el suelo que rodea el pozo, si la altura del agua en el pozo excavado se mantiene constante (Dynamic Monitors, 2022).

La prueba consiste en llenar el permeámetro Pask con agua y colocarlo en un pozo previamente excavado en el suelo y libre de materia vegetal. El permeámetro puede transferir hasta 4,000 cm³ de agua al suelo en cada prueba. El tubo de infiltración del permeámetro se inserta en el pozo, por lo que el pozo debe ser excavado con un diámetro ligeramente mayor al del tubo de infiltración. Además, el pozo debe tener una profundidad adecuada para que la zona de perforaciones por donde el agua sale del fondo del permeámetro esté sumergida por completo en el agua contenida en el pozo y el permeámetro se mantenga en una posición vertical durante la percolación.

La conductividad hidráulica saturada in situ se puede determinar utilizando la Ecuación 5 (Reynolds, 1993):

$$K_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + \frac{2\pi H}{\alpha}} \quad (5)$$

Donde C es el factor de forma adimensional que se obtiene de la Figura 14, el cual es igual a 1.12 en este caso debido a que la curva 1 es la que mejor se adapta al tipo de suelo in situ y H/a es alrededor de 2.73, Q es el caudal de infiltración en cm³/min, que se puede obtener multiplicando la tasa de descenso del agua en el reservorio en cm/min por el área de la sección transversal del tubo del reservorio, que es igual a 53.46 cm² para el permeámetro Pask estándar (Dynamic Monitors, 2022). Asimismo, H es la altura del agua estancada en el pozo, igual a 15 cm para este dispositivo (Dynamic Monitors, 2022) y a es el radio del pozo en el suelo, igual a 5.5 cm. Por último, α es un parámetro relacionado con la estructura y textura del suelo, que se puede obtener de la Tabla 14 (Reynolds, 2008; Reynolds et al., 2015) y para este estudio se consideró un valor de 0.12.

Tabla 14. Categorías de textura y estructura del suelo para la estimación del parámetro α mediante la inspección en el sitio.

Categoría de Estructura-Textura	Capilaridad del suelo	α (cm ⁻¹)
Arenas gruesas y con grava; también puede incluir algunos suelos muy estructurados con grandes grietas y/o macroporos	Débil	0.36

La mayoría de los materiales estructurados y de textura media, incluidos los suelos arcillosos y francos, así como las arenas medias no estructuradas. Esta categoría es generalmente la primera opción para la mayoría de los suelos	Moderada	0.12
Materiales porosos de textura fina y masivos, incluidos suelos arcillosos y limosos no estructurados, así como materiales arenosos de muy finos a finos	Fuerte	0.04
Materiales arcillosos compactados y sin estructura, como tapas y revestimientos de vertederos, sedimentos lacustres o marinos	Muy fuerte	0.01

Debido a que el valor de K_f medido in situ puede variar de manera significativa en función de la temperatura del agua utilizada en las pruebas (Dynamic Monitors, 2022), se debe utilizar la Ecuación 6:

$$K_a = K_{fs}(\mu_k/\mu_a) \quad (6)$$

Donde K_a es la conductividad hidráulica ajustada a las condiciones de temperatura del estudio, μ_k/μ_a es el factor de corrección de temperatura, μ_k es la viscosidad del agua utilizada en el permeámetro y μ_a es la viscosidad del agua a la temperatura de diseño ajustada. En este estudio, se utilizó agua a una temperatura ambiente de 18 °C, por lo que el factor de corrección de temperatura es igual a 0.667 (Streeter & Wylie, 1975).

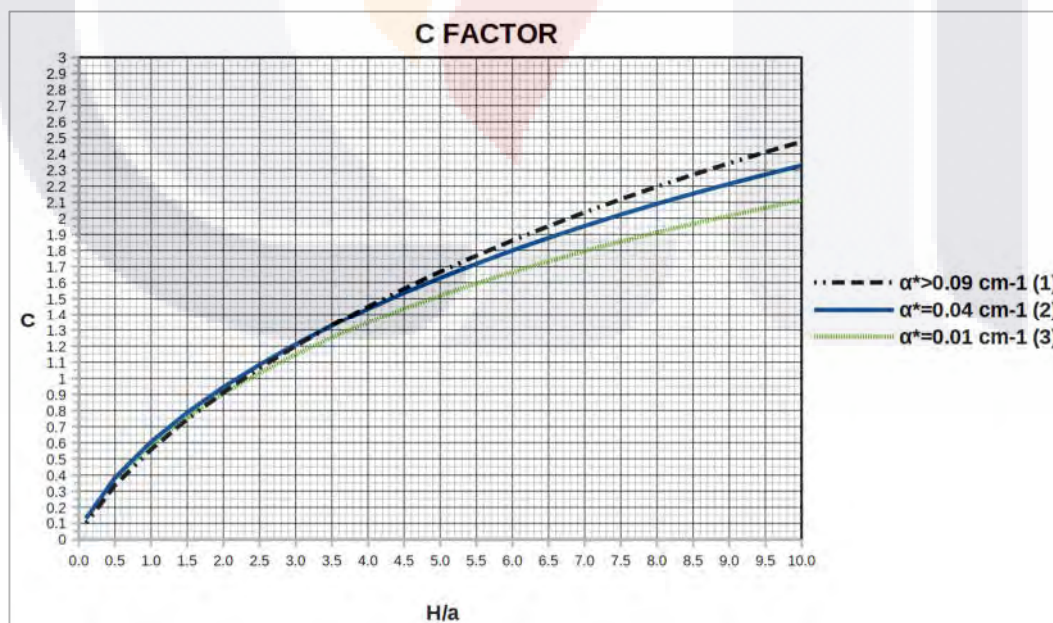


Figura 14. Valores del factor de forma adimensional C en función de la altura y radio del pozo y de la textura del suelo (Adaptado de Reynolds, 2008).

4.4.4 Datos de precipitación

El análisis de las precipitaciones extremas es importante para evaluar el alcance del agua durante los eventos de inundaciones en cualquier zona. Únicamente las observaciones y registros de las lluvias pueden proporcionar una base sólida para la estimación de las precipitaciones extremas (Koutsoyiannis & Papalexiou 2017). El enfoque probabilístico utilizado en este estudio se basa en los registros de las estaciones meteorológicas que se presentan en la Tabla 15. Dichas estaciones son las que tienen mayor influencia y se localizan dentro de un radio aproximado de 10 kilómetros del área de estudio.

Tabla 15. Características de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio.

Nombre y ID de Estación	Elevación (msnm)	Tipo de registros	Fuente y periodo de registros	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
Aguascalientes II (1097)	1929	24h	CONAGUA 1995-2018	782,573	2,424,896
Cañada Honda (1004)	1915	24h	CONAGUA 1970-2018	789,214	2,435,565

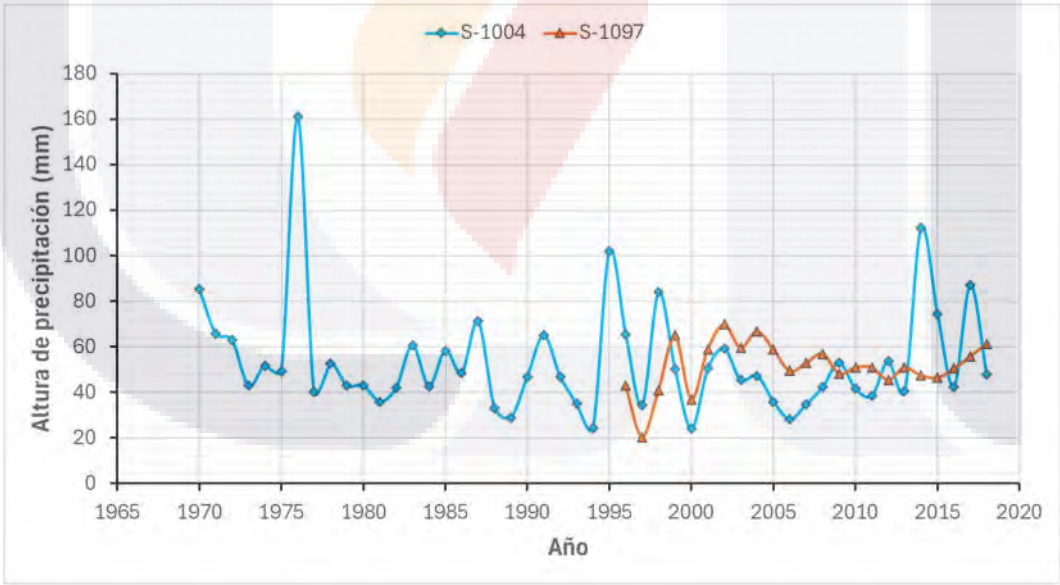


Figura 15. Valores máximos de lluvia en 24 horas utilizados para el análisis probabilístico de precipitaciones extremas.

La forma más común de analizar los registros provenientes de las estaciones meteorológicas es elegir los valores de precipitación más altos registrados en cada año (para una duración promedio dada) y

formar una muestra estadística de tamaño igual al número de años de los registros (Koutsoyiannis & Papalexiou 2017). La Figura 15 muestra los valores máximos en 24 horas que se obtuvieron de las estaciones y que conforman las series anuales. La serie de la estación 1004 contiene 49 datos, mientras que la serie de la estación 1097 contiene únicamente 23 datos.

4.4.5 Análisis de frecuencias de lluvias máximas

El propósito de un análisis de frecuencias de una serie anual de lluvias máximas es obtener la relación entre la magnitud de los eventos de lluvia y su probabilidad de excedencia (Subramanya, 2013). Para asignar probabilidades de excedencia a las series anuales, se utilizó la fórmula de Weibull, que viene dada por la Ecuación 7 (Subramanya, 2013; Martínez-Martínez, 2017):

$$P(X \geq x) = \left(\frac{m}{N + 1} \right) \quad (7)$$

Donde $P(X \geq x)$ es la probabilidad de que un evento de lluvia sea igualado o excedido, N es el tamaño de la serie y m es el número de orden. Al asignar probabilidades a una serie, se deben ordenar los valores de lluvia de mayor a menor y se debe asignar a cada uno un número de orden. Para la primera fila el número de orden es $m = 1$, para la segunda fila es $m = 2$, y así sucesivamente hasta llegar a la última fila donde m es igual al tamaño de la serie anual. Esta fórmula también se puede escribir como la Ecuación 8:

$$P(X \leq x) = 1 - \left(\frac{m}{N + 1} \right) \quad (8)$$

Donde $P(X \leq x)$ es la probabilidad de que un evento de lluvia NO sea igualado o excedido. El período de retorno se calculó con la Ecuación 9:

$$Tr = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (9)$$

Donde Tr es el periodo de retorno en años. El periodo de retorno se refiere al tiempo promedio en que un evento es igualado o excedido (Subramanya, 2013; Martínez-Martínez, 2017).

En regiones áridas, los registros de lluvia se ajustan mejor a distribuciones Log-normal o Gamma incompleta (Linsley et al., 1977). Entre las distribuciones utilizadas para analizar lluvias máximas diarias, se encuentran las siguientes (Martínez-Martínez, 2017): (1) Gamma incompleta, (2) Log-Pearson tipo III y (3) Gumbel (Gumbel-Powell o valores extremos tipo 1).

Como no se sabe cuál de estas distribuciones se ajusta mejor a los datos de las series, se obtuvieron los valores de cada distribución, y posteriormente se calculó el error estándar de ajuste para identificar el mejor ajuste, siguiendo el procedimiento indicado en Martínez-Martínez (2017).

Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos de las series anuales se muestran en la Tabla 16 y fueron calculados con base en las ecuaciones que aparecen en Martínez-Martínez (2017, pp. 350-353).

Tabla 16. Valores de los parámetros estadísticos de las series anuales de precipitación 1004 y 1097.

Parámetro	Estación	
	1004	1097
Numero de registros	49	23
Media aritmética	53.784	51.724
Desviación estándar	24.491	10.747
Coeficiente de variación	0.4554	0.2078
Coeficiente de asimetría	2.2601	-0.8655
Coeficiente de curtosis	10.1442	5.3049
Media logarítmica	1.6971	1.7023
Índice de variabilidad	0.1649	0.1094
Coeficiente de oblicuidad	0.7081	-2.0954

Gamma incompleta

Para aplicar la distribución gamma incompleta, se utiliza la Ecuación 10:

$$X_{gi} = \bar{x} + K_{gi}S \quad (10)$$

Donde X_{gi} es el valor particular de la variable hidrológica, $\bar{x}$ es la media aritmética de la muestra, K_{gi} es el factor de frecuencia de la distribución gamma incompleta y S es la desviación estándar de la serie. A su vez, el factor K_{gi} se calcula con la Ecuación 11 de la siguiente manera:

$$K_{gi} = \frac{1}{C_v} \left[\left(1 - \frac{C_v^2}{9} + \frac{K_n C_v}{3} \right)^3 - 1 \right] \quad (11)$$

Donde K_n es el factor de frecuencia de la distribución normal que se obtiene de la Tabla 17 y C_v es el coeficiente de variación, mismo que se obtiene dividiendo la desviación estándar entre la media aritmética de la serie. Esta ecuación da buenos resultados si se cumple que $0 \leq C_v \leq 0.2582$

(Martínez-Martínez, 2017). La serie de la estación 1097 tiene un C_v de 0.208 y se pudo ajustar utilizando esta ecuación.

Tabla 17. Factor de frecuencia K_n de la distribución normal en función de la probabilidad de no excedencia (Tomado de Martínez-Martínez, 2017).

$P(X \leq x)$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.001	∞	-3.0902	-2.8782	-2.7478	-2.6521	-2.5758	-2.5121	-2.4573	-2.4089	-2.3656
0.01	∞	-2.3263	-2.0537	-1.8808	-1.7507	-1.6449	-1.5548	-1.4758	-1.4051	-1.3408
0.1	-1.2816	-1.2265	-1.175	-1.1264	-1.0803	-1.0364	-0.9945	-0.9542	-0.9154	-0.8779
0.2	-0.8416	-0.8064	-0.7722	-0.7388	-0.7063	-0.6745	-0.6433	-0.6128	-0.5828	-0.5534
0.3	-0.5244	-0.4959	-0.4677	-0.4399	-0.4125	-0.3853	-0.3585	-0.3319	-0.3055	-0.2793
0.4	-0.2533	-0.2275	-0.209	-0.1764	-0.151	-0.1257	-0.1004	-0.0753	-0.0502	-0.0251
0.5	0	0.0251	0.0502	0.0753	0.1004	0.1257	0.151	0.1764	0.209	0.2275
0.6	0.2533	0.2793	0.3055	0.3319	0.3585	0.3853	0.4125	0.4399	0.4677	0.4959
0.7	0.5244	0.5534	0.5828	0.6128	0.6433	0.6745	0.7063	0.7388	0.7722	0.8064
0.8	0.8416	0.8779	0.9154	0.9542	0.9945	1.0364	1.0803	1.1264	1.175	1.2265
0.9	1.2816	1.3408	1.4051	1.4758	1.5548	1.6449	1.7507	1.8808	2.0537	2.3263
0.99	2.3263	2.3656	2.4089	2.4573	2.5121	2.5758	2.6521	2.7478	2.8782	3.0902

Otro proceso alternativo para aplicar la distribución gamma incompleta es utilizar la Ecuación 12:

$$X_{gi} = u S \quad (12)$$

Donde u es el valor de la variable reducida y S es la desviación estándar de la serie. El valor de la variable reducida se puede obtener en función de la probabilidad de no excedencia y del parámetro de forma “a”, tal y como se muestra en la Tabla 18. El parámetro de forma se calcula con la Ecuación 13:

$$a = \left(\frac{\bar{x}}{S} \right)^2 \quad (13)$$

Donde $\bar{x}$ es la media aritmética de la muestra.

Tabla 18. Valores de la variable reducida en la distribución Gamma incompleta de 2 parámetros (Tomado de Martínez-Martínez, 2017).

a	Valores de la variable reducida										
	Probabilidad de no excedencia										
	0.001	0.01	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.95	0.99	0.995	0.999
0.5	0	0	0	0.11	0.32	1.16	1.91	2.7	4.49	5.57	7.65
0.6	0	0	0	0.13	0.41	1.28	2.02	2.79	4.66	5.48	7.43
0.7	0	0	0	0.21	0.49	1.38	2.1	2.85	4.63	5.41	7.25

0.8	0	0	0	0.26	0.56	1.46	2.17	2.9	4.62	5.37	7.11
0.9	0	0	0	0.31	0.66	1.54	2.24	2.95	4.61	5.33	7
1	0	0	0.11	0.36	0.69	1.61	2.3	3	4.61	5.3	6.91
1.5	0	0	0.24	0.58	0.97	1.9	2.55	3.19	4.6	5.24	6.64
2	0	0.1	0.37	0.78	1.19	2.12	2.75	3.36	4.69	5.26	6.53
2.5	0	0.17	0.51	0.95	1.38	2.31	2.92	3.5	4.77	5.3	6.49
3	0.11	0.24	0.63	1.1	1.54	2.47	3.07	3.64	4.85	5.36	6.48
3.5	0.14	0.3	0.75	1.25	1.7	2.62	3.21	3.76	4.94	5.41	6.5
4	0.21	0.41	0.87	1.38	1.84	2.76	3.34	3.88	0.03	5.49	6.53
4.5	0.26	0.49	0.98	1.51	1.97	2.89	3.46	3.99	5.11	5.56	6.57
5	0.32	0.57	1.09	1.62	2.09	3.01	3.58	4.09	5.19	5.63	6.62
6	0.41	0.72	1.29	1.84	2.31	3.23	3.79	4.29	5.36	5.78	6.72
7	0.57	0.88	1.47	2.04	2.52	3.43	3.98	4.48	5.51	5.92	6.83
8	0.69	1.02	1.64	2.23	2.71	3.62	4.16	4.65	5.66	6.06	6.94
9	0.81	1.16	1.81	2.47	2.89	3.79	4.33	4.81	5.8	6.19	7.05
10	0.93	1.31	1.97	2.57	3.06	3.96	4.49	4.97	5.94	6.34	7.17
11	1.04	1.43	2.12	2.73	3.22	4.12	4.68	5.12	6.08	6.45	7.28
12	1.16	1.46	2.26	2.88	3.37	4.27	4.79	5.26	6.2	6.58	7.39
13	1.27	1.69	2.4	3.02	3.51	4.39	4.83	5.4	6.33	6.7	7.5
14	1.39	1.81	2.53	3.16	3.65	4.55	5.07	5.53	6.45	6.82	7.6
15	1.49	1.93	2.66	3.29	3.79	4.68	5.2	5.65	6.57	6.93	7.71
a	1.001	1.01	1.11	1.429	2	5	10	20	100	200	1000
Periodo de Retorno Tr (años)											

Log-Pearson III

Para aplicar la distribución Log-Pearson III se utilizó la Ecuación 14:

$$\text{Log } X_{LP} = \overline{\text{Log } x} + K_{LP} I_v \quad (14)$$

Donde K_{LP} es el factor de frecuencia de la distribución Log-Pearson e I_v es el índice de variabilidad.

El factor K_{LP} viene dado por la Ecuación 15:

$$K_{LP} = \frac{2}{g} \left[\left(1 - \frac{g^2}{36} + \frac{K_n g}{6} \right)^3 - 1 \right] \quad (15)$$

Donde g es el coeficiente de oblicuidad y K_n es el factor de frecuencia de la distribución normal, mismo que se obtiene de la Tabla \$. A su vez, el índice de variabilidad viene dado por la Ecuación 16:

$$I_v = \sqrt{\frac{\sum (\text{Log } x_i - \overline{\text{Log } x})^2}{n - 1}} \quad (16)$$

Donde n es el número total de datos de la serie. Por último, el coeficiente de oblicuidad viene dado por la Ecuación 17:

$$g = \frac{n}{(n-1)(n-2)I_v^3} \Sigma (\text{Log} x_i - \overline{\text{Log} x})^3 \quad (17)$$

Gumbel

La ecuación general de la distribución Gumbel viene dada por la Ecuación 18 (Subramanya, 2013):

$$X_G = \bar{x} + K_G S \quad (18)$$

Donde X_G es el valor de la variable x de la serie hidrológica aleatoria con un periodo de retorno Tr , $\bar{x}$ es la media de la serie en mm, K_G es el factor de frecuencia de la distribución Gumbel y S es la desviación estándar de la serie. El factor de frecuencia depende del período de retorno y de la distribución de frecuencia, y su valor se obtiene con la Ecuación 19:

$$K_G = \frac{y_T - y_n}{S_n} \quad (19)$$

Donde y_T es la variable reducida, y_n es la media reducida que se da en la Tabla 19 y S_n es la desviación estándar reducida que se obtiene de la Tabla 20. A su vez, el valor de la variable reducida se calcula con la Ecuación 20:

$$y_T = \ln \left[\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right] \quad (20)$$

Donde Tr es el periodo de retorno en años.

Tabla 19. Valor de la media reducida en la distribución Gumbel. N es el tamaño de la serie (Tomado de Subramanya, 2013).

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.4952	0.4996	0.5035	0.5070	0.5100	0.5128	0.5157	0.5181	0.5202	0.5220
20	0.5236	0.5252	0.5268	0.5283	0.5296	0.5309	0.5320	0.5332	0.5343	0.5353
30	0.5362	0.5371	0.5380	0.5388	0.5396	0.5402	0.5410	0.5418	0.5424	0.5430
40	0.5436	0.5442	0.5448	0.5453	0.5458	0.5463	0.5468	0.5473	0.5477	0.5481
50	0.5485	0.5489	0.5493	0.5497	0.5501	0.5504	0.5508	0.5511	0.5515	0.5518
60	0.5521	0.5524	0.5527	0.5530	0.5533	0.5535	0.5538	0.5540	0.5543	0.5548
70	0.5548	0.5550	0.5552	0.5555	0.5557	0.5559	0.5561	0.5563	0.5565	0.5567
80	0.5569	0.5570	0.5572	0.5574	0.5576	0.5578	0.5580	0.5581	0.5583	0.5585
90	0.5586	0.5587	0.5589	0.5591	0.5592	0.5593	0.5595	0.5596	0.5598	0.5599
100	0.5600									

Tabla 20. Valor de la desviación estándar reducida en la distribución Gumbel. N es el tamaño de la serie (Tomado de Subramanya, 2013).

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.9496	0.9476	0.9833	0.9971	1.0095	1.0206	1.0316	1.0411	1.0493	1.0565
20	1.0628	1.0696	1.0754	1.0811	1.0864	1.0915	1.0961	1.1004	1.1047	1.1086
30	1.1124	1.1159	1.1193	1.1226	1.1255	1.1285	1.1313	1.1339	1.1363	1.1388
40	1.1413	1.1436	1.1458	1.1480	1.1499	1.1519	1.1538	1.1557	1.1574	1.1590
50	1.1607	1.1623	1.1638	1.1658	1.1667	1.1681	1.1696	1.1708	1.1721	1.1734
60	1.1747	1.1759	1.1770	1.1782	1.1793	1.1803	1.1814	1.1824	1.1834	1.1844
70	1.1854	1.1863	1.1873	1.1881	1.1890	1.1898	1.1906	1.1915	1.1923	1.1930
80	1.1938	1.1945	1.1953	1.1959	1.1967	1.1973	1.1980	1.1987	1.1994	1.2001
90	1.2007	1.2013	1.2020	1.2026	1.2032	1.2038	1.2044	1.2049	1.2055	1.2060
100	1.2065									

4.4.6 Datos de Intensidad-Duración-Frecuencia de lluvias máximas

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) se diseñaron utilizando la fórmula de Chen, la cual se ha utilizado en la República Mexicana para zonas que no cuentan con registros pluviales de corta duración y es válida periodos de retorno mayores a 2 años y duraciones de tormenta de hasta 24 horas (Campos-Aranda, 2010, Martínez-Martínez, 2017, Gámez-Balmaceda, 2020). La fórmula viene dada por la Ecuación 21:

$$R_t^{Tr} = \frac{a R_1^{10} \log(10^{2-X} Tr^{X-1}) t}{60 (t + b)^c} \quad (21)$$

Donde R_t^{Tr} es la lluvia en mm para una duración (t) y periodo de retorno (Tr) dados, R_1^{10} es la lluvia en mm generada en una hora para un periodo de retorno de 10 años, (X) es la razón de lluvia-frecuencia, (Tr) es el periodo de retorno en años, (t) es la duración en minutos, (a), (b) y (c) son los parámetros de tormenta, que varían según la localidad. Las razones X y R están relacionadas con las características de lluvia de la zona. La fórmula anterior se puede expresar alternativamente en términos de intensidad de lluvia multiplicando el lado derecho de la ecuación por $(60/t)$, lo que resulta en la Ecuación 22:

$$P_t^{Tr} = \frac{a R_1^{10} \log(10^{2-X} Tr^{X-1})}{(t + b)^c} \quad (22)$$

Donde P_t^{Tr} es la intensidad de lluvia en mm/h para cualquier duración (t) y periodo de retorno (Tr) dados. Con los valores obtenidos de P_t^{Tr} para diferentes duraciones de una tormenta se pueden

obtener las curvas IDF para cualquier periodo de retorno dado. Asimismo, la razón de lluvia-frecuencia se determina mediante la Ecuación 23:

$$X = \frac{R_t^{100}}{R_t^{10}} \quad (23)$$

Donde R_t^{100} y R_t^{10} son las lluvias en mm de duración (t) y periodos de retorno de 100 y 10 años, respectivamente. Chen encontró que el valor de X varió aproximadamente en el rango de 1.33 a 1.63 en 34 ciudades de Estados Unidos (Chen, 1983). Por su parte, la razón de lluvia-duración se determina mediante la Ecuación 24:

$$R = \frac{R_1^{Tr}}{R_{24}^{Tr}} \quad (24)$$

Donde R_1^{Tr} y R_{24}^{Tr} son las lluvias en mm con periodo de retorno Tr y duraciones de 1 y 24 horas, respectivamente. En esta fórmula es conveniente que Tr sea igual a 10 años. Es importante determinar el valor R , ya que a partir de este se obtienen los valores de los parámetros de tormenta (a), (b) y (c) mediante el gráfico de la Figura 16 propuesto por Chen (1983). En este caso, como sólo se cuenta con información pluvial con duraciones de 24 horas de las estaciones climatológicas, no se conoce el valor de R_1^{Tr} , por lo que es necesario adoptar el valor de la razón R de otras investigaciones. En este sentido, Campos-Aranda (2010) encontró que el valor promedio de R era de 0.50 para un pluviógrafo ubicado en Aguascalientes, aproximadamente a 8 kilómetros del área de estudio. Si el valor de R es de 0.50 y el periodo de retorno es de 10 años, se puede determinar con el ajuste de la serie anual el valor de R_{24}^{10} , y a partir de estos datos se puede despejar y calcular el valor de R_1^{10} .

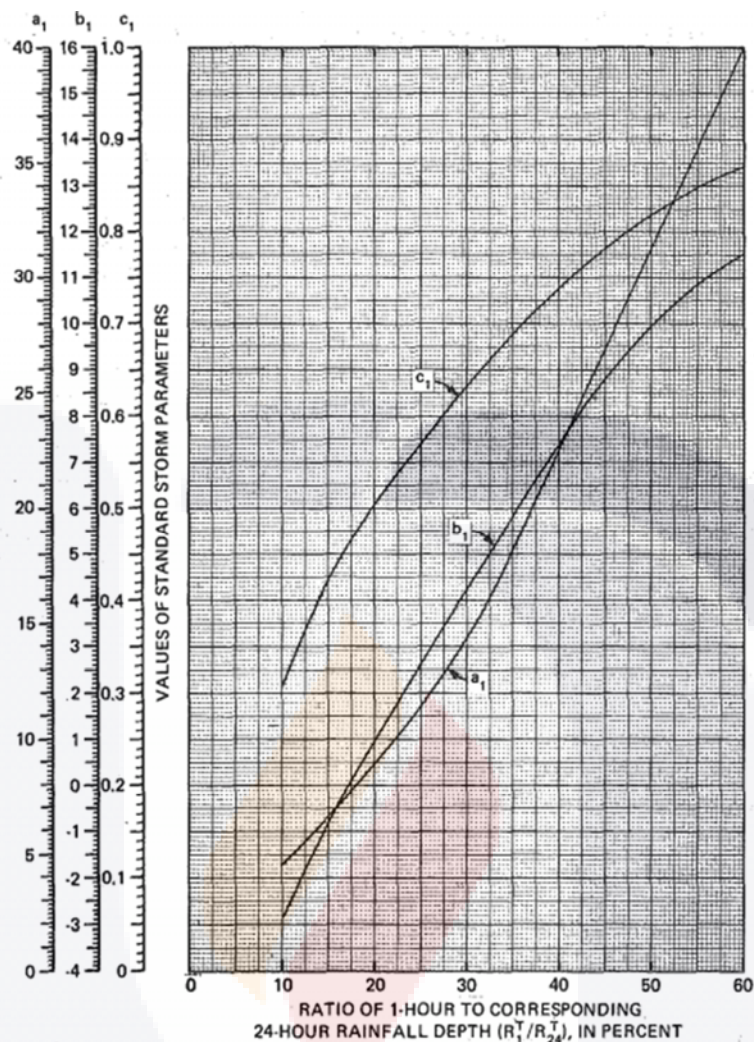


Figura 16. Valores de los parámetros de tormenta a , b y c en función de la razón de lluvia-duración (Tomado de Chen, 1983).

4.4.7 Hietogramas

Se utilizó el método de bloques alternados para obtener los hietogramas. Un hietograma de lluvia es un gráfico que representa la profundidad de la lluvia versus el tiempo, y el método de bloques alternados utiliza los valores incrementales de precipitación (bloques) de las curvas IDF para obtener hietogramas de diseño con base en un periodo de retorno (Chow et al., 1988).

Para aplicar este método, primero se debe seleccionar la ubicación del bloque central, es decir, el bloque de profundidad incremental máxima, pudiendo elegir entre valores de 25, 33, 50, 67 o 75% del tiempo medido desde el comienzo hasta la duración final de una tormenta. Los demás bloques

se organizan en orden descendente, alternando a derecha e izquierda del bloque central (Chow et al., 1988).

En este estudio, los hietogramas se elaboraron considerando una tormenta de 12 horas y colocando el bloque central en el centro de la tormenta, es decir, al 50% del tiempo medido desde el comienzo de la tormenta.

4.5 Modelación hidrológica

El análisis hidrológico de la cuenca se llevó a cabo mediante HEC-HMS, el cual es un programa desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. La palabra HEC-HMS es el acrónimo en inglés de Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System, que significa Sistema de Modelado Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica. La elección de este programa se realizó considerando que es de uso libre, está bien documentado y permite calcular los procesos hidrológicos mediante enfoques empíricos, conceptuales y basados en procesos físicos.

Por otra parte, HEC-HMS utiliza los datos topográficos de los modelos digitales de elevación para delimitar la cuenca y dividirla a su vez en subcuencas. Esta subdivisión permite adoptar una estructura semidistribuida, es decir, se divide el área hidrológica en subcuencas y la escurrimiento se calcula para cada punto de salida de cada subcuenca. La elección de un enfoque semidistribuido se utilizó en esta investigación debido a que representa características importantes de la cuenca hidrológica y se pueden conseguir los datos para aplicarlo con las metodologías descritas en la sección 4.4.

El objetivo principal de la modelación hidrológica es obtener los hidrogramas de diseño, mismos que muestran cuánto es el volumen de escurrimiento a la salida de la cuenca durante una tormenta en función de un periodo de retorno.

En HEC-HMS el análisis hidrológico se divide en 3 pasos principales:

- 1) El primer paso consiste en calcular el porcentaje de precipitación que se convertirá en volumen de escurrimiento, considerando principalmente las pérdidas por infiltración del agua al suelo.
- 2) El segundo paso comprende en aplicar un método de transformación del volumen de precipitación en escurrimiento puntual en la salida de la cuenca hidrológica o de las subcuencas.

- 3) El tercer paso es el proceso de enrutamiento, que se refiere a la modelación del agua a través del arroyo (sistema fluvial) considerando las variaciones de caudal a lo largo del tiempo y el espacio.

En esta investigación se utilizó el método empírico SCS-CN para la ejecución de los primeros dos pasos. Tal y como señalan Sitterson et al. (2017), las cuencas hidrográficas no aforadas que no cuentan con registros históricos de la variación de los caudales en el afluente principal se modelan mejor mediante métodos empíricos, debido a la falta de información específica sobre la cuenca para la aplicación de enfoques más complejos.

El método SCS-CN permite realizar análisis hidrológicos en cuencas pequeñas con un error aceptable en los valores obtenidos de escorrentía (USDA, 1986). Se basa en estimar los números de curva (CNs) en la cuenca o subcuencas. Estos números de curva están calculados en función del tipo de suelo, la cobertura vegetal, la cantidad de áreas impermeables, entre otras características, y pueden tomar un valor de 0 a 100 según sea la capacidad de la cuenca de generar escorrentía, es decir, valores cercanos a 0 representan condiciones de poca o nula escorrentía donde la mayor parte del agua se infiltra directamente al suelo, mientras que los valores cercanos a 100 están asociados a cuencas impermeables con un alto potencial de generación de escorrentía (USDA, 1986; NRCS, 2004).

Por otra parte, para ejecutar el tercer paso, que se refiere al proceso de enrutamiento, se utilizó el método de Muskingum.

4.5.1 Conversión de lluvia a escorrentía

Para calcular cuánto volumen de la precipitación total se convertirá en escorrentía, se debe realizar un balance hídrico en la cuenca que tome en cuenta los siguientes factores: la infiltración, la evapotranspiración, la cantidad de agua interceptada por el sistema de drenaje existente, entre otros. Es importante señalar que el alcance de este estudio contempla principalmente el cálculo de la infiltración, ya que no se toma en cuenta la cantidad de agua que pueda ser captada por los sistemas de drenaje existentes. Asimismo, se ignoran las pérdidas por evapotranspiración, ya que las inundaciones generalmente ocurren en cortos periodos de tiempo.

Para aplicar el método empírico SCS-CN, se requiere calcular el valor de algunos parámetros, entre los que destacan el Número de Curva (CN) y la abstracción inicial (Ia). El Número de Curva toma en cuenta el porcentaje de precipitación que se infiltra en el suelo en función de los siguientes factores:

el grupo hidrológico del suelo, la condición de humedad antecedente (AMC), el área y el uso/cobertura de suelo (USDA, 1986).

La Condición de Humedad Antecedente (AMC) se refiere a la humedad relativa del suelo de la cuenca antes del inicio del evento de lluvia simulado. El método SCS-CN permite estimar los números de curva con base en las siguientes configuraciones del parámetro AMC:

- **Tipo I.** El suelo está seco debido a la falta de lluvia en los últimos 5 días.
- **Tipo II.** Es la condición promedio de humedad y se refiere a que se ha presentado una cierta cantidad de lluvia en los últimos 5 días. Los valores del número de curva de la Tabla 12 se basan en esta condición.
- **Tipo III.** El suelo está muy húmedo debido a la ocurrencia de fuertes lluvias en los últimos 5 días.

En la estimación de los volúmenes de escorrentía de una inundación, el parámetro AMC generalmente debe configurarse para condiciones altas o muy altas de humedad, ya que se busca evaluar las condiciones más adversas (Burn et al., 2017). Tomando en cuenta lo anterior, se seleccionó un parámetro AMC intermedio entre II y III que representa condiciones de humedad alta, ya que se consideró que los valores de AMC III son muy elevados.

Una vez que se establecieron los tipos de uso/cobertura de suelo, se calcularon los números de curva en función de cada grupo hidrológico de suelo. En este caso, el valor del número de curva para la cobertura de suelo de tipo urbano se determinó considerando 40% de áreas impermeables, 30% de espacios abiertos, 20% de distritos residenciales y 10% de distritos comerciales (ver Tabla 12). Los números de curva obtenidos para cada clasificación se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Números de curva CN de la cuenca de acuerdo con el tipo de cobertura y el grupo hidrológico del suelo.

Grupo Hidrológico del Suelo	Valor de CN según el tipo de cobertura					
	Rural	Urbano	Agrícola	Recién Nivelado	Granjas	Cuerpos de Agua
A	58	84	81	83	68	0
B	75	90	88	90	81	0
C	83	93	91	94	87	0
D	88	94	93	96	90	0

Por último, en la Tabla 22 se enlistan los porcentajes de cobertura de suelo y el valor del número de curva estimado en cada subcuenca.

Tabla 22. Porcentaje de cobertura de suelo por clase y número de curva de cada subcuenca.

Sub-cuenca	% de uso/cobertura de suelo							CN Valor ponderado
	Área (km2)	Rural	Urbano	Agrícola	Recién Nivelado	Granjas	Cuerpos de Agua	
SC1	2.381	71.9	3.3	6.9	14.6	2.3	1.0	77.9
SC2	1.176	72.2	1.0	4.9	11.3	10.7	—	85.2
SC3	2.705	83.8	0.4	9.8	6.0	—	—	84.5
SC4	2.394	81.4	4.0	14.5	—	—	0.1	84.4
SC5	4.436	65.7	11.8	22.6	—	—	—	86.0
SC6	0.973	57.3	40.1	2.7	—	—	—	87.2
SC7	2.470	18.9	81.1	—	—	—	—	79.1
SC8	1.165	54.8	43.1	2.1	—	—	—	87.5
SC9	0.484	34.5	65.5	—	—	—	—	89.5
	18.184							

4.5.2 Conversión de escorrentía a caudal puntual

Para transformar el porcentaje de precipitación en escorrentía puntual en cada subcuenca se utilizó el método de hidrograma unitario sintético SCS-CN. Para utilizar este método en HEC-HMS se requiere calcular el valor de 2 parámetros: el tiempo de retardo y el factor de caudal pico (PRF). El tiempo de retardo se refiere al lapso entre el comienzo de escorrentía de un evento de tormenta sobre una cuenca hidrográfica y el caudal pico de escorrentía en la salida de dicha cuenca (NRCS, 2010). Por otra parte, PRF es un parámetro que modifica la forma de un hidrograma unitario (es decir, la duración y el pico máximo de escorrentía) manteniendo igual el volumen total de escorrentía, y puede variar dependiendo de la pendiente del terreno (Cahyono & Adidarma, 2019). En esta investigación, los valores de PRF se asignaron a cada subcuenca en función de la pendiente media del terreno, de acuerdo con los valores propuestos en investigaciones recientes (Cahyono & Adidarma, 2019).

El tiempo de retardo se calculó mediante las siguientes Ecuaciones 25, 26 y 27 (NRCS, 2010):

$$L = 0.6 T_c \quad (25)$$

$$T_c = \frac{l^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{1140Y^{0.5}} \quad (26)$$

$$S = \frac{1000}{cn'} - 10 \quad (27)$$

Donde T_c es el tiempo de concentración (en horas), l es la longitud de flujo más larga de la cuenca (en pies), S es la retención potencial máxima (en pulgadas), cn' es el factor de retardo y Y es la pendiente media del terreno de la cuenca (en %). En este caso, el valor del factor de retardo se asumió igual al valor del número de curva en cada subcuenca. En la [Tabla 23](#) se muestran los valores utilizados para calcular el tiempo de retardo.

Tabla 23. Tiempo de retardo, factor de gasto pico y parámetros del método SCS de cada subcuenca.

Subcuenca	Longitud de flujo más larga (m)	Retención potencial máxima (pulg)	Pendiente media (%)	Tiempo de concentración (min)	Tiempo de retardo (min)	PRF
SC1	2759	4.09	14.0	64.3	38.6	400
SC2	2500	4.11	15.1	57.3	34.4	400
SC3	2967	4.33	15.1	67.7	40.6	400
SC4	3199	4.29	16.0	69.6	41.8	450
SC5	4601	3.73	16.8	84.0	50.4	450
SC6	2108	3.32	25.5	34.3	20.6	550
SC7	3474	2.12	32.2	36.2	21.7	600
SC8	2715	3.23	25.3	41.5	24.9	550
SC9	1625	2.58	31.0	22.1	13.3	600

4.5.3 Proceso de enrutamiento

El enrutamiento es una técnica que predice, a partir de los datos de una o más secciones aguas arriba, cómo cambia la forma de un hidrograma de diseño a medida que la escorrentía se mueve a través de una corriente o río (HEC-HMS, 2024). Al aplicar un método de enrutamiento en HEC-HMS, se calcula la magnitud y velocidad de la escorrentía, permitiendo obtener el hidrograma de diseño en la salida de cada subcuenca.

En este caso se utilizó el método empírico de Muskingum, el cual es un método bien establecido que utiliza un enfoque de conservación de masa para dirigir el flujo a través del tramo o tramos del arroyo y además, tiene en cuenta el efecto de la histéresis de manera parcial (HEC-HMS, 2024).

Los parámetros utilizados para aplicar el método se muestran en la **Tabla 24**. Para aplicar el método se siguió el procedimiento recomendado por el manual técnico de referencia de HEC-HMS.

Tabla 24. Parámetros del método de enrutamiento de Muskingum para el área hidrológica.

Tramo	Longitud del tramo (m)	Velocidad de onda (m/s)	K (hr)	X	Paso de tiempo de simulación (min)	No. de subtramos
1	567.15	1.524	0.103	0.25	1	6
2	2226.38	1.524	0.406	0.25	1	24
3	2837.96	1.524	0.517	0.25	1	31
4	1879.59	1.524	0.343	0.25	1	21

4.6 Obtención de datos para la modelación hidráulica

4.6.1 Datos topográficos y de cobertura de suelo

En esta sección se muestra el procedimiento que se siguió para obtener datos topográficos y de uso de suelo, utilizando un dron DJI Air 3, así como técnicas de fotogrametría y GIS.

Características del dron utilizado para realizar fotogrametría

La captura de imágenes se realizó utilizando un dron DJI Air 3. Este dispositivo cuenta con una cámara gran angular de 24 mm que permite la captura de escenarios grandes, ya que cuenta con un campo de visión amplio y mantiene a su vez una distorsión mínima de los objetos (Da-Jiang Innovations [DJI] 2022). La cámara tiene un sensor CMOS (acrónimo en inglés de Complementary Metal Oxide Semiconductor, que significa semiconductor de óxido metálico complementario) de 1/1.3 pulgadas y toma fotos con una resolución de hasta 48 megapíxeles cuando se utiliza una relación de aspecto de 4:3 (8,064 x 6,048 píxeles). Los parámetros de dicha cámara son los siguientes: apertura fija de F1.7, sensibilidad a la luz ISO de 100 hasta 3200 y velocidad de obturación de 1/8000 segundos hasta 2 segundos [24]. Asimismo, el dron cuenta con un sistema GNSS para la ubicación de las imágenes, cuya precisión es de ± 0.5 m para las coordenadas de posición, mientras que la precisión de la altitud no está especificada (DJI, 2022).

Levantamiento de fotogrametría

Durante la recopilación de imágenes se pudo observar que la calidad de éstas fue superior cuando se trabajó en condiciones de cielo nublado, o durante la salida o puesta del sol. Metashape evalúa la calidad de las imágenes con base en su grado de nitidez [11] y durante condiciones de sol se

producen más áreas oscuras con poca nitidez, por lo que es recomendable tomar las fotografías durante condiciones óptimas. Todas las imágenes son de tipo vertical, es decir, capturadas con el eje de la cámara orientado lo más verticalmente posible hacia el suelo. Se descartó la combinación de imágenes verticales y oblicuas, ya que esto provocó un mayor error en la planimetría de la nube de puntos (coordenadas X, Y). Además, el dron se colocó en posición estática al momento de tomar cada fotografía para disminuir las distorsiones y mejorar la nitidez. En todos los casos se eligió una resolución y una relación de aspecto de 12 megapíxeles y 4:3, respectivamente (4,032 x 3,024 píxeles). Se adoptó un enfoque de múltiples vistas en el cual las imágenes recopiladas se clasificaron en 2 conjuntos con base en la altura de vuelo a la que fueron capturadas, y cada conjunto contiene imágenes de distintos vuelos. El esquema general de la recopilación de imágenes se muestra en la Figura 17.

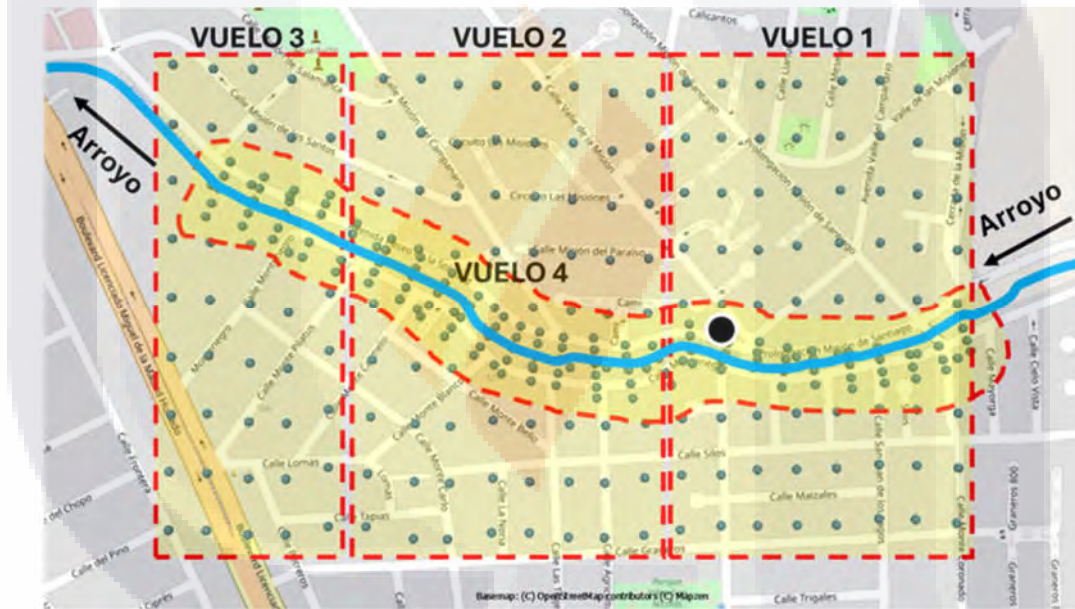


Figura 17. Recopilación de imágenes en el área de estudio. El círculo negro señala la ubicación del punto de despegue del dron en todos los vuelos. Los círculos azules indican la posición de la cámara al momento de capturar cada imagen. Las flechas negras muestran la dirección del arroyo (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

El primer conjunto consta de 189 imágenes de los vuelos 1, 2 y 3 que conforman un mosaico de 9 imágenes de alto por 21 imágenes de ancho que cubre toda el área de estudio. La cámara se colocó a una altura de 180 m. Se optó por mantener la sensibilidad a la luz y la velocidad de obturación en modo automático, debido a las condiciones variables de iluminación que se presentaron durante la

recopilación. Debido a la duración de cada batería, se requirió realizar 3 vuelos para completar la captura de todo el mosaico. En este sentido, es importante mencionar que el GPS del dron arrojó variaciones de decenas de metros en el valor de altitud entre los vuelos, aunque estos se realizaron el mismo día de manera consecutiva y en todo momento se mantuvo la misma altura con respecto al punto de despegue, por lo que se optó por realizar un ajuste de la altitud durante la etapa de procesamiento. El grado de superposición frontal y lateral entre imágenes fue de aproximadamente 66 % y 83 %, respectivamente, como se muestra en la Figura 18.



Figura 18. El recuadro rojo indica el grado de superposición frontal y lateral entre imágenes en el conjunto 1. Las figuras 3a y 3c muestran la superposición frontal de 66 %, mientras que las figuras 3b y 3d muestran la superposición lateral de 83 % (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

El segundo conjunto se compone de 117 imágenes capturadas durante el vuelo 4 y tiene como objetivo capturar con mayor grado de detalle el cauce del arroyo. Como algunas partes del arroyo tenían poca iluminación y en consecuencia aparecían con poca nitidez en las imágenes, se optó por utilizar la cámara en modo manual para aumentar el valor ISO de sensibilidad a la luz y mejorar la nitidez en dichos puntos, pero sin sobreexponer demasiado el resto de cada imagen. Se trabajó con una altura de 80m con respecto al punto de despegue. La captura de imágenes a una altura menor

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

a 80 metros no mostró buenos resultados, ya que se observó que Metashape requiere identificar puntos de enlace no sólo entre las imágenes de un mismo conjunto sino también entre conjuntos con diferentes características (con diferentes alturas en este caso). Al no existir suficientes puntos de enlace entre los conjuntos de imágenes de un proyecto, se observó que Metashape no pudo alinear correctamente las imágenes. El grado de superposición frontal y lateral entre imágenes fue de aproximadamente 83 % y 66 %, respectivamente, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. El recuadro rojo indica el grado de superposición frontal y lateral entre imágenes en el conjunto 2. Las figuras 3a y 3c muestran la superposición frontal (83 %), mientras que las figuras 3b y 3d muestran la superposición lateral (66 %).

Procesamiento de datos geoespaciales

El procesamiento de los datos geoespaciales procedentes de las imágenes se realizó utilizando el programa de fotogrametría Agisoft Metashape v.1.8.4 y los programas SAGA GIS v.7.8.2 y QGIS v.3.28.9. SAGA es el acrónimo en inglés de System for Automated Geoscientific Analyses que significa sistema para análisis geocientíficos automatizados, mientras que QGIS es el acrónimo en inglés de Quantum GIS que significa sistema de información geográfica Quantum. Asimismo, se utilizó el siguiente hardware: CPU Intel Core i7-8750H, RAM de 16 Gb con velocidad de 2667 MHz y GPU

NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti de 4 Gb. Como se muestra en la Figura 20, el procesamiento de datos geoespaciales se dividió en 3 etapas: alineación, modelo digital de elevaciones y modelo digital de cobertura del suelo (MCS).

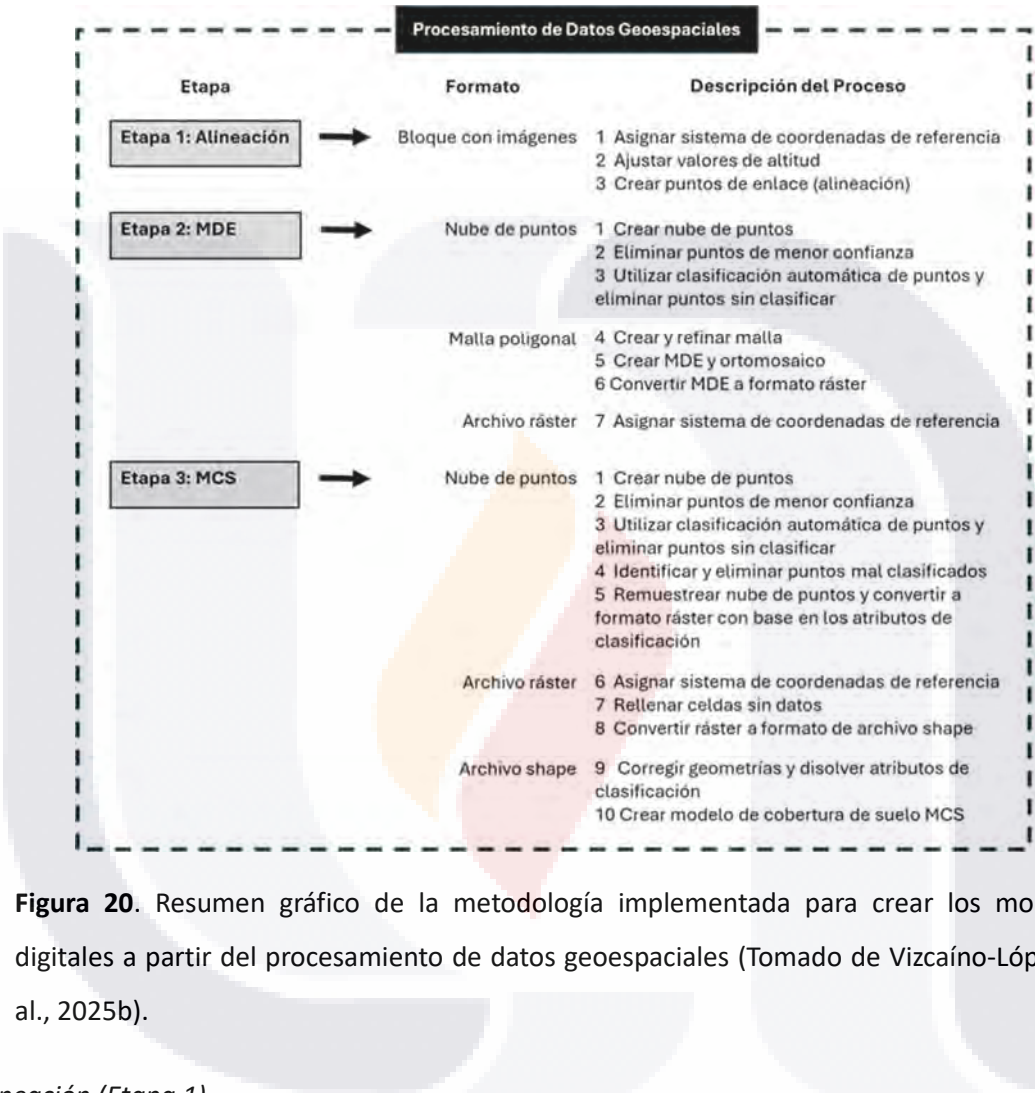


Figura 20. Resumen gráfico de la metodología implementada para crear los modelos digitales a partir del procesamiento de datos geoespaciales (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

Alineación (Etapa 1)

La alineación es la primera etapa del procesamiento fotogramétrico, y aquí el programa crea puntos de enlace con base en los puntos en común identificados entre todas las imágenes (Agisoft, 2022; Polat et al., 2023). Al crear un bloque y añadir todas las imágenes, en Metashape existe la opción de estimar la calidad de las imágenes con base en su grado de nitidez, lo que resulta en un valor entre 0 y 1 siendo mayor el valor para las fotografías con más nitidez. Se verificó que todas las imágenes del proyecto tuvieran una buena nitidez para no afectar los resultados de la alineación (Agisoft, 2022). En el levantamiento realizado la calidad media de las imágenes para el conjunto 1 fue de 0.93

con una desviación estándar de 0.03, mientras que para el conjunto 2 fue de 0.84 y 0.02, respectivamente. Para ejecutar la alineación en Metashape se seleccionaron los siguientes parámetros: precisión máxima de 10,000 puntos de paso por foto y emparejamiento guiado con límite de puntos clave por megapíxel de 2,000. La opción de emparejamiento guiado aumenta la cantidad de puntos clave por imagen y mejora los resultados de imágenes que contienen vegetación sin aumentar demasiado el tiempo de procesamiento (Agisoft, 2022).

Las coordenadas de las imágenes (latitud, longitud y elevación) calculadas por el GNSS del dron se cargan de manera automática en Metashape, pero fue necesario asignar el sistema de coordenadas de referencia con el que se trabajó durante todo el proceso. En este caso, se eligió el sistema de coordenadas México ITRF 2008 UTM Zona 13 EPSG 6368. Las siglas ITRF son el acrónimo en inglés de International Terrestrial Reference Frame, que significa Marco de Referencia Terrestre Internacional, mientras que UTM es el acrónimo en inglés de Universal Transverse Mercator, que significa sistema de coordenadas universal transversal de Mercator.

Un obstáculo que se presentó en esta etapa fue la mala precisión de la altitud calculada por el GNSS del dron. Fue necesario cambiar el valor de altitud de las imágenes por un valor de referencia en Metashape, ya que se obtuvieron diferencias de decenas de metros entre las imágenes de cada vuelo realizado. Para realizar el ajuste, se consideró como dato de referencia la altitud del punto de despegue indicado en la Figura 17 que tiene un valor de 1865.25 msnm. Este dato de referencia se obtuvo del DEM LiDAR de INEGI con resolución espacial de 1.5 m del año 2021. Los valores de altitud obtenidos con el GNSS del dron y los valores de ajuste realizados en cada uno de los vuelos se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Ajuste de los valores de altitud de las imágenes con base en el dato de referencia.

No. Vuelo	GNSS del dron		Dato de referencia	
	Altitud punto de despegue (msnm)	Altitud de vuelo (msnm)	Altitud punto de despegue (msnm)	Altitud de vuelo (msnm)
Vuelo 1	1858.12	2038.12	1865.25	2045.25
Vuelo 2	1886.71	2066.71	1865.25	2045.25
Vuelo 3	1902.56	2082.56	1865.25	2045.25
Vuelo 4	1906.08	1986.08	1865.25	1945.25

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

todos los puntos con un nivel de confianza de 0 a 4 (puntos de color rojo, naranja y amarillo), que representaban el 66.8% de la nube de puntos inicial. Asimismo, se eliminaron puntos perimetrales para obtener una superficie rectangular, tal y como se muestra en la Figura 21.

Metashape puede clasificar los puntos de una nube mediante algoritmos de aprendizaje automático y una vez clasificados, éstos se pueden omitir en la creación de la malla poligonal. Está disponible cualquier combinación de las siguientes clases: terreno, vegetación alta, edificios, firme de la carretera (pavimentos), vehículos y objetos artificiales. Como se busca reconstruir una topografía del terreno sin árboles ni arbustos, en la clasificación se seleccionó únicamente la clase de vegetación alta. Al efectuar una clasificación fue necesario indicar un nivel de confianza dentro del rango de 0 a 1, y en este caso se eligió un valor de 0.20, tal y como se muestra en la Figura 22b. Con este nivel de confianza quedaron algunos puntos de vegetación sin clasificar, principalmente en el arroyo y en otras zonas que contienen árboles y arbustos. No obstante, los puntos sin clasificar pueden ser identificados y eliminados manualmente de la nube de puntos utilizando las herramientas de navegación y selección de Metashape. Es importante señalar que niveles de confianza menores a 0.20 pueden llegar a clasificar todos los puntos de la vegetación alta, pero la desventaja es que también se seleccionarán puntos que pertenecen a otras clases y, por consiguiente, se puede llegar a perder por completo la topografía en zonas con mucha vegetación. Por otra parte, al utilizar niveles de confianza mayores a 0.20 se incrementará demasiado la cantidad de puntos de vegetación residuales y generalmente resultará difícil eliminarlos. La Figura 22c muestra la nube de puntos después de eliminar la vegetación alta.

Los parámetros para la creación de la malla poligonal fueron los siguientes: origen de datos nube densa, tipo de superficie bajorrelieve 2.5D, interpolación habilitada y en la opción de clases de puntos, deshabilitar la clase de vegetación alta. En tipo de superficie que se recomienda usar es la opción 2.5D en lugar de la opción de 3D, ya que es más adecuada para procesar grandes conjuntos de fotografías aéreas y modelar superficies planas (Agisoft, 2022). Si al crear la malla aún quedan puntos de vegetación residuales, aparecerán errores, pero bastará con regresar a la nube densa para eliminar dichos puntos y crear nuevamente la malla poligonal. La Figura 22d muestra la malla poligonal generada a partir de la nube de puntos. Por último, se refinó la malla poligonal para suavizar las superficies donde existen espacios vacíos, utilizando los siguientes parámetros: calidad media, 10 iteraciones y suavidad de 0.50.

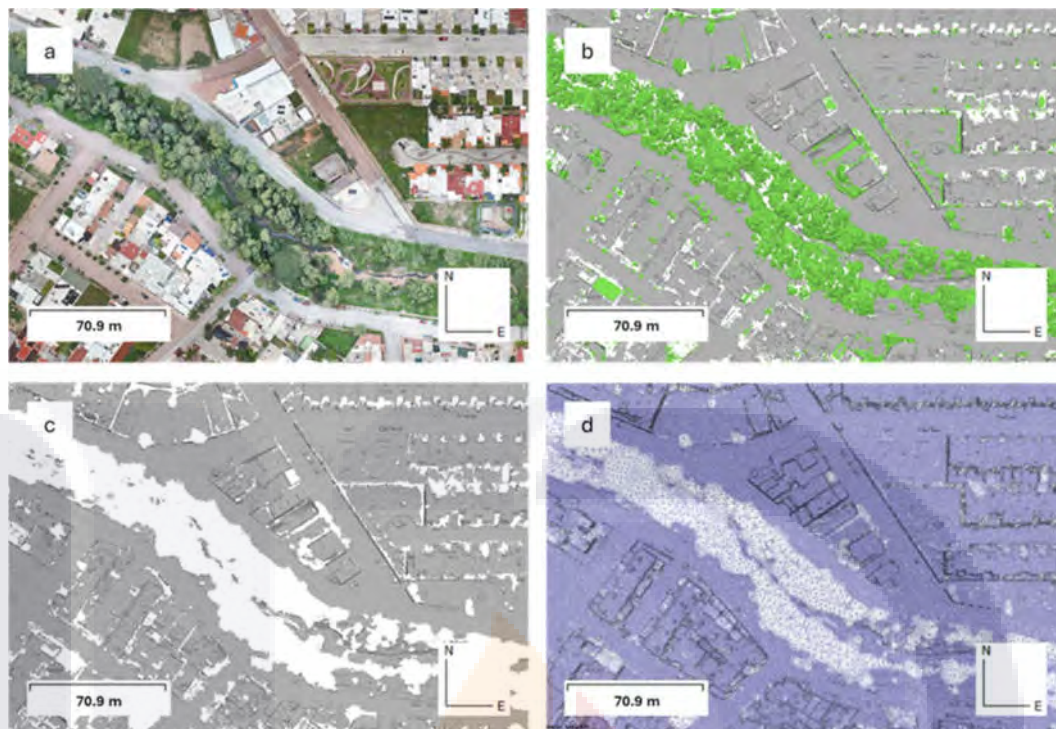


Figura 22. (a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Nube de puntos. El color verde indica la clasificación de vegetación alta (c) Nube de puntos después de eliminar la vegetación alta. (d) Malla poligonal resultante (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

Posteriormente, se utilizó la malla poligonal para generar un DEM tipo superficie utilizando los siguientes parámetros: origen de datos malla poligonal, interpolación habilitada por defecto. Asimismo, se creó el ortomosaico utilizando como parámetro de superficie el DEM y activando la opción de refinar líneas de costura. El uso de estos parámetros es recomendado para procesamiento de imágenes de estudios aéreos (Agisoft, 2022). Para finalizar el procesamiento fotogramétrico, el DEM y el ortomosaico se exportaron con un formato ráster GeoTIFF.

Modelo digital de cobertura de suelo (Etapa 3)

En la etapa 3 se creó un modelo de cobertura de suelo (MCS) que se utilizó en la simulación numérica para la asignación de los coeficientes de rugosidad de Manning. Se realizó un procesamiento fotogramétrico para obtener una nube de puntos clasificada y después se utilizaron sistemas de información geográfica para crear un MCS a partir de dicha nube, en un formato compatible con el programa de modelación HEC-RAS. Los detalles del proceso se describen a continuación.

Al igual que en la etapa anterior, se creó una nube de puntos, se eliminaron los puntos de menor confianza y los puntos perimetrales utilizando las mismas opciones para obtener una nube de puntos como la de la Figura 21. Posteriormente, se realizó una clasificación automática de los puntos con un nivel de confianza de 0.20, pero esta vez se seleccionaron las 6 clases disponibles. Con este nivel de confianza el 92.41% de los puntos quedaron clasificados y el resto fueron eliminados. La Figura 23 muestra una sección del arroyo una vez aplicada la clasificación y eliminados los puntos sin clasificar.

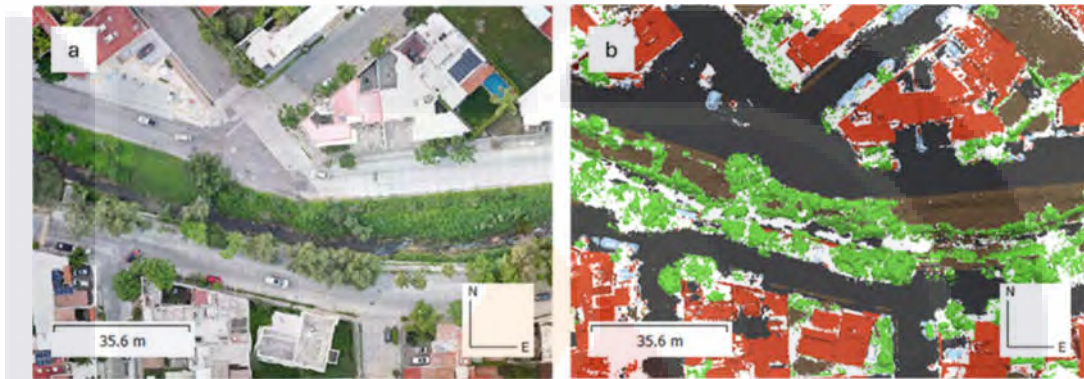


Figura 23. (a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Nube de puntos clasificada. Los colores corresponden a las siguientes clasificaciones: blanco=espacios vacíos, café oscuro=suelo, verde=vegetación alta, rojo=edificios, negro=pavimentos, azul=vehículos.

Es importante mencionar que, al utilizar la clasificación automática algunos puntos de cada una de las clases quedaron mal clasificados y tuvieron que ser eliminados de forma manual utilizando las opciones de filtrado y navegación para obtener mejores resultados en la creación del MCS. En este caso se eliminaron los puntos mal clasificados en el cauce del arroyo, dejando únicamente los puntos que corresponden a las clases de suelo y vegetación. También se analizaron los puntos que fueron creados dentro de la clase de edificios y se eliminaron los puntos mal clasificados, principalmente los generados en las calles y avenidas, así como en zonas de suelo y vegetación. Este último paso es importante debido a que la clase edificios suele tener asignado un coeficiente de rugosidad mucho más alto comparado con las demás clases, ya que se esperaba que el agua no pasara a través de las viviendas y edificios.

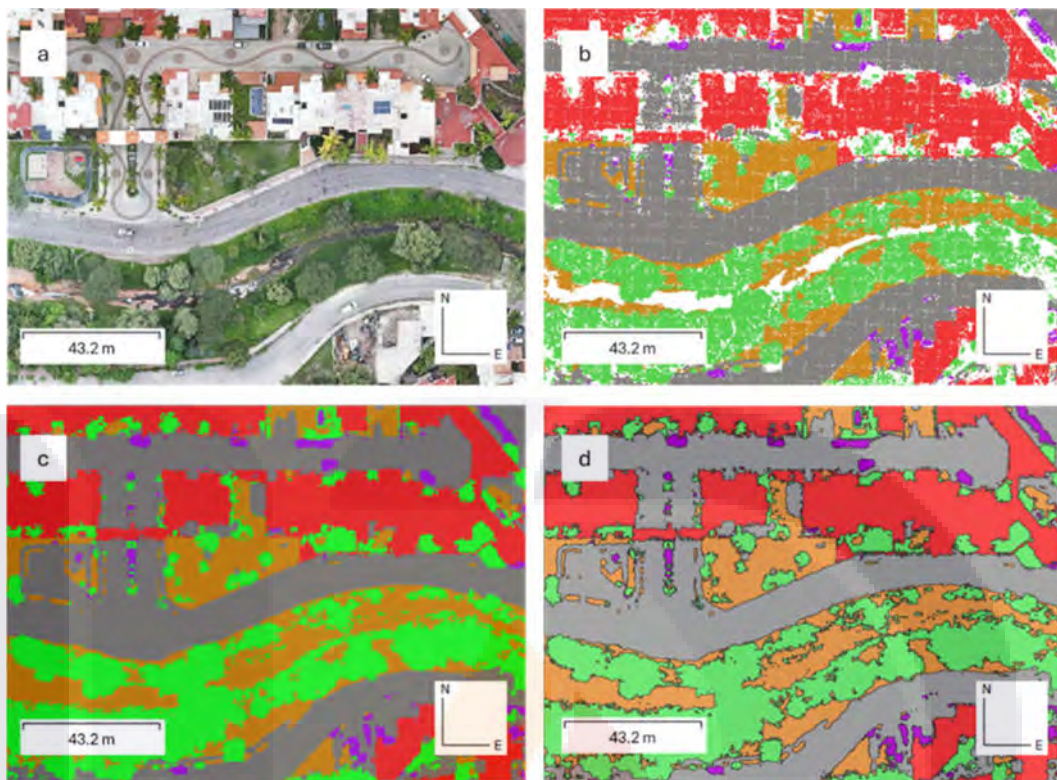


Figura 24. (a) Imagen de referencia de una sección del arroyo. (b) Archivo ráster con resolución de 0.30m. Los colores corresponden a las siguientes clasificaciones: blanco = celdas sin datos, café = suelo, verde = vegetación alta, rojo = edificios, gris = pavimentos, morado = objetos artificiales. (c) Archivo ráster con celdas sin datos rellenas. (d) Archivo shape con resolución de 0.30 m.

Para finalizar con el procesamiento fotogramétrico, se utilizó la opción de remuestrear para cambiar la resolución de la nube a 0.30 m y así reducir el número de puntos, ya que al procesar nubes muy densas en los sistemas de información geográfica se requieren mayores capacidades computacionales. La nube de puntos se exportó en un formato ASPRS LAS (.las), adecuado para el intercambio de datos de nubes de puntos 3D, y que tiene la ventaja de que se pueden añadir los atributos de clasificación de los puntos.

El uso de los programas SAGA GIS y QGIS permitió obtener un MCS compatible con el programa de modelación numérica HEC-RAS, a partir de la nube de puntos. El primer paso fue convertir la nube de puntos a un archivo en formato ráster con extensión GeoTIFF (.tif) y resolución de 0.30 m, con base en los atributos de clasificación, utilizando SAGA GIS. Después, como la malla ráster contiene celdas sin datos tal y como se visualiza en la Figura 24b, estas se rellenaron utilizando las

herramientas de geoproceto y el resultado es la malla ráster de la Figura 24c. Por último, el ráster se convirtió a un formato shape (.shp), tal y como se muestra en la Figura 24d, para lograr la compatibilidad con el programa de modelación hidráulica HEC-RAS.

4.6.2 Transporte de Sedimentos

Debido a la dificultad que implica obtener datos de campo de transporte de sedimentos, los datos de la curva de calibración de este estudio están basados en los parámetros reportados por otras investigaciones, tal y como se describe en esta sección.

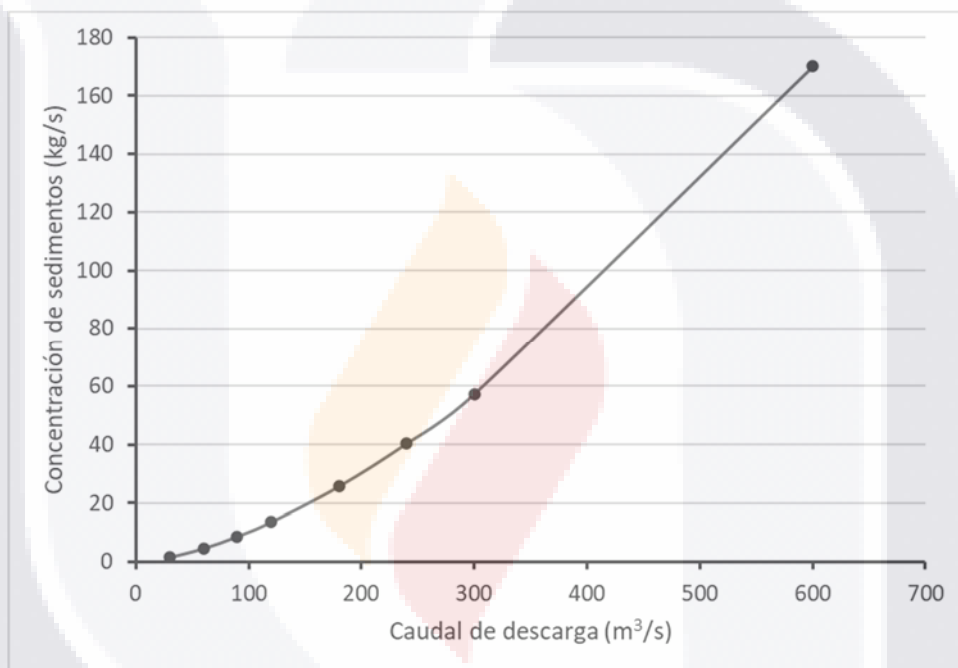


Figura 25. Curva de clasificación de sedimentos propuesta para el modelo numérico de inundaciones.

Efthimiou (2019) propuso la Ecuación 28, que relaciona el caudal de descarga con la cantidad de sedimentos suspendidos, de la siguiente manera:

$$Q_s = 0.0074Q^{1.57} \quad (28)$$

Donde Q_s es el flujo de sedimentos suspendidos en kg/s y Q es el caudal de descarga en m³/s. Esta ecuación se obtuvo a partir de registros de mediciones en campo simultáneas de caudal de descarga y flujo de sedimentos suspendidos. Dichas mediciones se realizaron principalmente en la etapa de

diseño de proyectos de construcción de represas (Efthimiou, 2019). La Figura 25 muestra la curva de clasificación de sedimentos generada utilizando la ecuación anterior.

Por otra parte, Nelson et al. (2022) propusieron un gráfico que relaciona el tipo de sedimentos suspendidos en función del caudal observado en un afluente, tal y como se muestra en la Tabla 26. Estos datos provienen del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y dichas observaciones muestran que si se incrementa el caudal de descarga entonces el flujo de sedimentos suspendidos contiene un mayor porcentaje de partículas gruesas.

Tabla 26. Tipo de sedimentos en suspensión observados en función del caudal de descarga (Nelson et al., 2022).

Tipo de sedimentos	Tamaño (mm)	Caudal de descarga (m³/s)							
		30	60	90	120	180	240	300	600
Limo muy fino y limo medio	0.004-0.032	22%	22%	21%	21%	20%	20%	20%	17%
Limo grueso	0.032-0.0625	22%	21%	21%	20%	20%	20%	19%	17%
Arena muy fina	0.0625-0.125	21%	20%	21%	21%	21%	20%	21%	17%
Arena fina	0.125-0.25	11%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	11%
Arena gruesa	0.25-1	21%	21%	21%	22%	22%	23%	23%	26%
Arena muy gruesa y grava	1-8	3%	4%	5%	5%	6%	6%	7%	12%

4.7 Modelación hidráulica

En las modelaciones hidráulicas se trabajó con 2 modelos numéricos bidimensionales en el programa HEC-RAS v. 6.5. La palabra HEC-RAS es el acrónimo en inglés de Hydrologic Engineering Center - River Analysis System, que significa Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Análisis de Ríos. Este programa es utilizado para la modelación hidráulica de inundaciones y tiene la importante característica que aunque no es de código abierto, sí es de uso libre. Ambos modelos se describen a continuación.

El primer modelo comprende una zona específica del arroyo, y tiene como finalidad observar las diferencias al utilizar la topografía LiDAR de INEGI y la topografía obtenida con técnicas de fotogrametría y GIS. El dominio del modelo es la geometría de la malla poligonal de la Figura 26, la cual tiene las siguientes características: resolución espacial de 1.0 m en el cauce del arroyo y 2.0 m

en el resto del área, número de polígonos: 27,000. El dominio se refiere al área de cálculo que se necesita especificar para resolver el sistema físico de inundación (United States Geological Survey [USGS], 2024). La resolución de la malla debe ser más fina en el cauce del arroyo, ya que esto puede permitir determinar con mayor precisión los posibles desbordamientos de agua, lo cual es fundamental en este tipo de modelos.

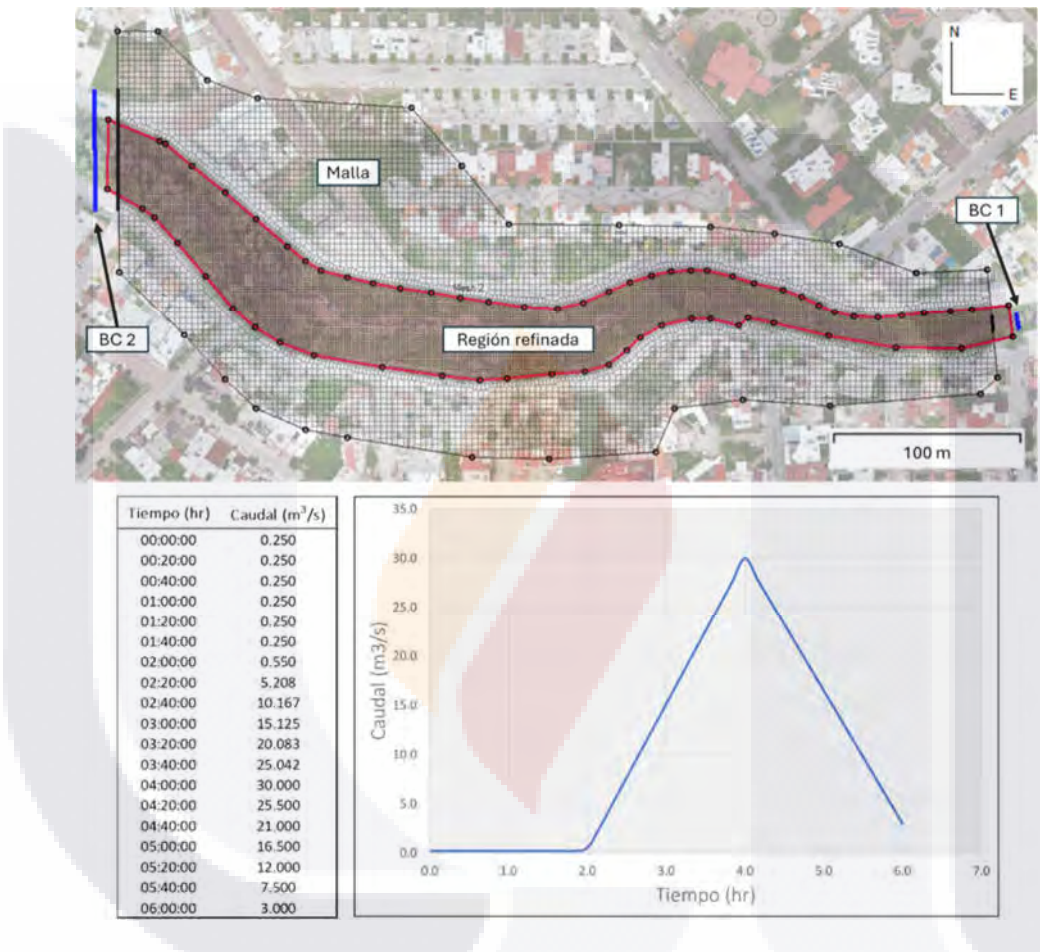


Figura 26. Geometría y condiciones de frontera del modelo de simulación numérica. BC 1 y BC 2 son las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo, respectivamente (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

El modelo requiere indicar condiciones de frontera de entrada y salida, es decir, se debe especificar dónde y qué cantidad de agua entrará al modelo, por cuánto tiempo y por donde podrá salir el agua (USGS, 2024). Como se eligió un modelo de flujo transitorio (unsteady flow), la condición de frontera aguas arriba es el hidrograma de caudal que se muestra en la Figura 26, el cual es un hidrograma que no está calibrado y se utilizó únicamente para propósitos de comparación de los resultados de

topografía. Un hidrograma es un gráfico que indica la variación del flujo de agua de un río o arroyo a lo largo del tiempo (Wohl, 2013). Por su parte, para la condición de frontera aguas abajo se utilizó la opción de profundidad normal, la cual es utilizada para representar condiciones reales en arroyos y requiere pocos datos de entrada (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System [HEC-RAS], 2024).

El segundo modelo se muestra en la Figura 27 y abarca el área de inundación que se ubica aguas abajo del punto de salida de la cuenca hidrológica. La malla tiene una resolución espacial de 5 metros y en la parte del arroyo se refinó a 2 metros. La condición de frontera aguas arriba son las escorrentías indicadas en los hidrogramas que se determinaron mediante el análisis hidrológico. La condición de frontera aguas abajo utiliza la opción de profundidad normal.

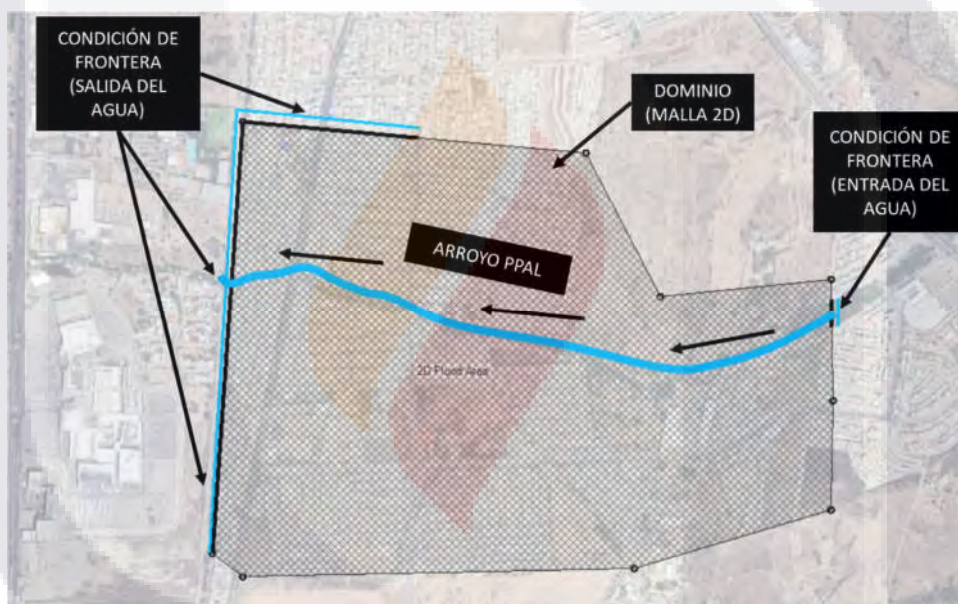


Figura 27. Dominio y condiciones de frontera del modelo hidráulico en el programa de modelación numérica HEC-RAS.

CAPÍTULO V: Resultados

Los resultados se dividen en 3 secciones. En la primera sección se muestran los resultados experimentales que se realizaron para evaluar la obstrucción por sedimentos en el concreto permeable. En la segunda sección se muestran los resultados relacionados con las modelaciones hidrológicas que se llevaron a cabo para determinar las escorrentías máximas en la cuenca de estudio, con base en un periodo de retorno dado. Por último, en la tercera sección se muestran los resultados relacionados con las modelaciones hidráulicas, mismas que se realizaron para evaluar los datos topográficos obtenidos con técnicas de fotogrametría y GIS.

5.1 Modelación de sistemas de infiltración

5.1.1 Porosidad y Permeabilidad

En este apartado se incluyen los resultados experimentales del sistema de infiltración de concreto permeable, los cuales muestran los valores de permeabilidad y porosidad que se observaron en el concreto permeable.

El parámetro de porosidad obtenido de las 8 muestras presentó un estrecho rango de variación, con un mínimo de 26 %, resultado en una muestra, un máximo de 28 % presentado en dos muestras y un promedio de 27 %, que también resultó en cuatro muestras y que, finalmente, se utilizó como entrada en la parte numérica. La Tabla 27 muestra los parámetros experimentales utilizados para obtener la porosidad mediante el método de diferencia de masas. Los resultados de porosidad indican que el procedimiento de preparación de la muestra fue suficientemente homogéneo.

Los parámetros permeabilidad y velocidad de filtración también presentaron un estrecho rango de variación como se puede observar en la Tabla 28. La permeabilidad varió de 1.75 a 1.96 mm/s, con un valor promedio de 1.86 mm/s, mientras que la velocidad de infiltración varió de 8.28 a 9.61 mm/s, con un valor promedio de 8.98 mm/s. Como se mencionó anteriormente, el valor promedio de la velocidad de infiltración se utilizó en el primer escenario de las simulaciones, mientras que el valor de 2.43 mm/s se utilizó en las simulaciones para el segundo escenario.

Tabla 27. Porosidad obtenida a partir de los resultados experimentales de las muestras de concreto permeable (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

Muestra	Masa seca de la muestra (gr)	Masa de la muestra sumergida en agua (gr)	Volumen aparente de la muestra (cm ³)	Porosidad
1	2121	1191	1257	0.26
2	2109	1205	1257	0.28
3	2140	1220	1257	0.27
4	2133	1217	1257	0.27
5	2134	1228	1257	0.28
6	2130	1213	1257	0.27
7	2132	1218	1257	0.27
8	2115	1206	1257	0.28
Promedio				0.27

Tabla 28. Resultados experimentales de permeabilidad y velocidad de filtración de las muestras de concreto permeable (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

Muestra	Área (cm ²)	Volumen de agua (cm ³) *	Tiempo (s) **	Porosidad	Permeabilidad (mm/s)	Velocidad de filtración (mm/s)
1	78.54	2290	119.46	0.26	1.86	9.38
2	78.54	2240	120.11	0.28	1.81	8.46
3	78.54	2440	120.53	0.27	1.96	9.61
4	78.54	2390	119.23	0.27	1.94	9.41
5	78.54	2190	120.62	0.28	1.76	8.28
6	78.54	2430	120.05	0.27	1.96	9.53
7	78.54	2280	119.72	0.27	1.85	8.89
8	78.54	2150	119.46	0.28	1.75	8.28
Promedio					1.86	8.98

* Volumen de agua recuperado en el recipiente debajo de la muestra.

** Tiempo necesario para que el agua caiga de la muestra.

5.2 Modelación hidrológica

Los resultados de la modelación hidrológica se dividen en 6 partes. Los datos de uso de suelo y permeabilidad son necesarios para poder aplicar el método empírico del número de curva SCS-CN y determinar la infiltración y la escorrentía en la cuenca. El análisis de frecuencias permite asignar

periodos de retorno a los eventos históricos de lluvia que se han presentado en la cuenca de estudio, para poder obtener posteriormente las curvas IDF, los hietogramas y los hidrogramas.

5.2.1 Uso de Suelo

El mapa de uso y cobertura de suelo obtenido se muestra en la Figura 28. La clasificación de los tipos de cobertura en la cuenca incluyó las siguientes clases:

- **Rural.** Incluye todas las áreas rurales con crecimiento salvaje de matorrales, maleza y pasto.
- **Urbano.** Incluye áreas impermeables, espacios abiertos, distritos residenciales y comerciales.
- **Agrícola.** Incluye barbechos con cobertura de residuos de cultivos
- **Recién nivelado.** Incluye áreas recién niveladas con cobertura permeable y sin vegetación.
- **Granjas.** Incluye edificios, caminos, entradas para vehículos y lotes circundantes de las granjas.
- **Cuerpos de agua.** Incluye estanques y bordos para almacenar agua.

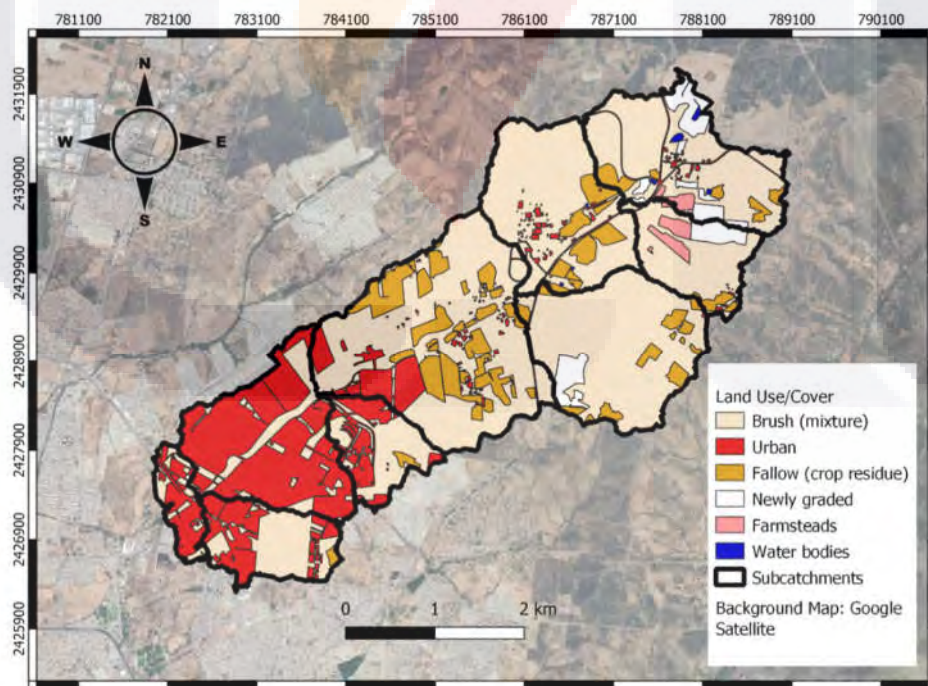


Figura 28. Mapa de uso y cobertura de suelo del área hidrológica obtenido mediante la aplicación de sistemas de información geográfica.

La creación del mapa de manera manual en el programa QGIS permitió incluir todas las coberturas de suelo existentes en la cuenca, ajustándose a las coberturas de suelo identificadas por el método empírico SCS-CN del número de curva. Como esta metodología se basa en delinear de manera manual cada uno de los elementos que pertenecen a cada tipo de cobertura, puede resultar efectiva únicamente en cuencas pequeñas donde la mayor parte del suelo no ha sido urbanizado y la cantidad de elementos no es tan alta. En cuencas altamente urbanizadas resultará más adecuado obtener los datos de uso de suelo mediante técnicas de fotogrametría y GIS.

5.2.2 Permeabilidad del suelo

Con respecto a la conductividad hidráulica, se realizó una prueba para cada subcuenca, exceptuando la subcuenca 3 a la cual no se pudo acceder debido a que se encontraba en un espacio privado, sumando un total de 8 pruebas, tal y como se muestra en la Figura 29. Los valores de conductividad hidráulica saturada y el grupo hidrológico del suelo se muestran en la Tabla 29. Es importante mencionar que el grupo hidrológico de la subcuenca 3 no se determinó, ya que no se pudo acceder físicamente al lugar por tratarse de un terreno privado.

Tabla 29. Determinación del grupo hidrológico de cada subcuenca con base en el valor obtenido de conductividad hidráulica saturada del suelo.

Punto / Subcuenca	X (UTM Zona 13Q)	Y (UTM Zona 13Q)	Tasa de descenso del agua (cm/min)	Conductividad Hidráulica Saturada (mm/hr)	Grupo hidrológico del suelo
1	788328	2431286	1.614	16.78	B
2	787409	2430617	0.675	7.02	C
3	786782	2429258	-	-	
4	786352	2430369	1.011	10.51	C
5	785694	2429407	0.841	8.74	C
6	784480	2427960	0.516	5.36	C
7	783240	2428164	4.026	41.86	A
8	783300	2426780	0.540	5.61	C
9	782050	2427309	0.346	3.60	C

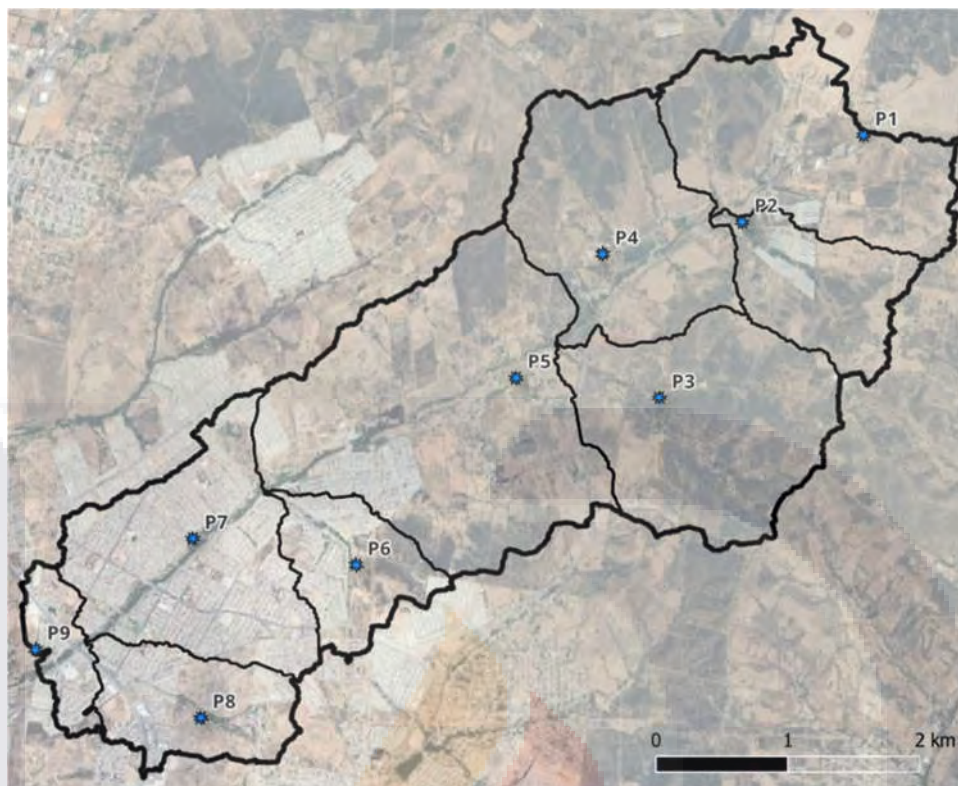


Figura 29. Localización de los puntos de muestreo donde se llevaron a cabo las pruebas de permeabilidad del suelo.

5.2.3 Análisis de Frecuencias

Las Figuras 35 y 36 muestran los valores de las series y los ajustes logrados con las funciones de distribución Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel, incluyendo las extrapolaciones hasta un periodo de retorno de 1000 años. En el Anexo 1 se incluyen también los cálculos de los parámetros principales y los valores de los ajustes de distribución de cada serie, en las tablas A1, A2, A3 y A4.

El error estándar de ajuste en la serie 1004 fue de 8.43, 5.90 y 7.87 para las distribuciones Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel, respectivamente. Se puede ver que, tanto de manera gráfica en la Figura 30 como en el error la distribución, Log-Pearson III consiguió los mejores resultados.

En la serie 1097 el error estándar de ajuste fue de 3.44, 3.20 y 4.22 para las distribuciones Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel, respectivamente. Como puede verse en la Figura 31, la distribución Gamma incompleta consigue el mejor ajuste y aunque tiene un error estándar ligeramente mayor que la distribución Log-Pearson, se considera como la mejor adaptación.

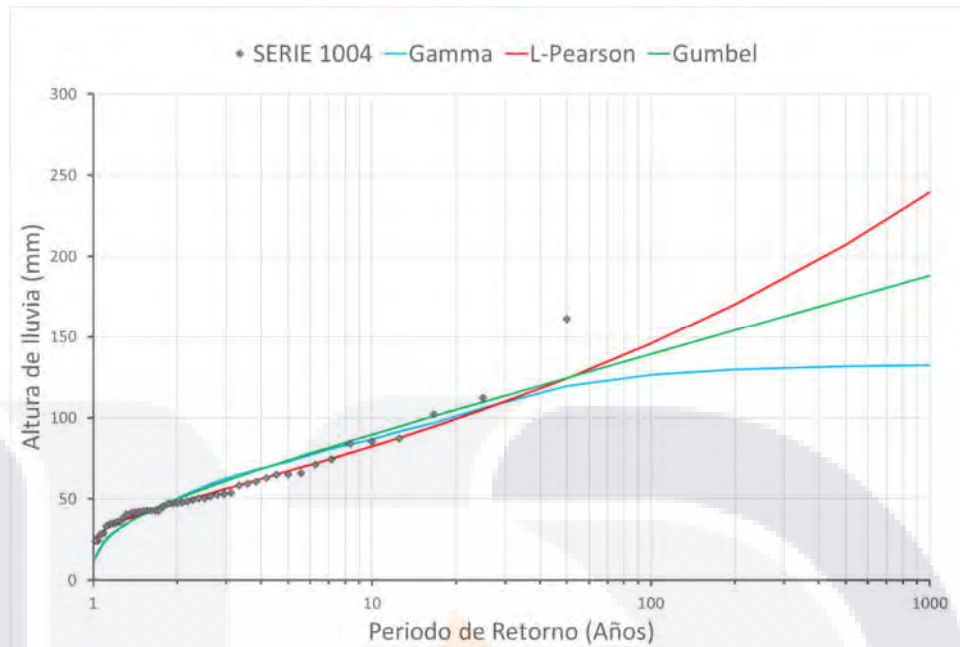


Figura 30. Valores de la serie 1004 y ajustes logrados con las funciones de distribución Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel.

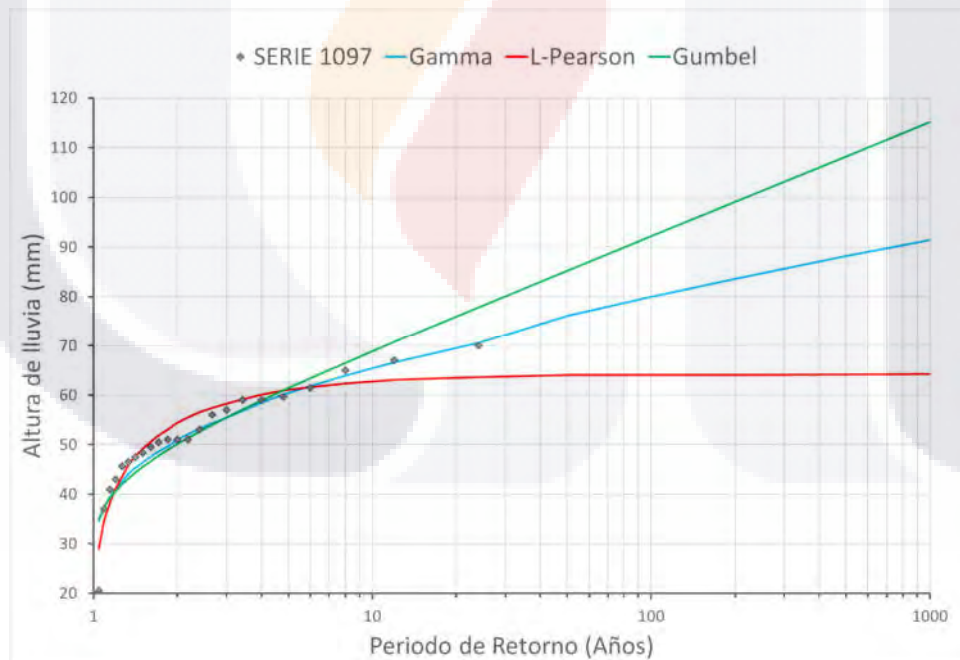


Figura 31. Valores de la serie 1097 y ajustes logrados con las funciones de distribución Gamma incompleta, Log-Pearson III y Gumbel.

Martínez-Martínez (2017) señala que para realizar un análisis de frecuencias se debe contar con series que tengan 25 o más registros. Como la serie 1004 contiene un mayor número de registros en comparación con la serie 1097, creemos que produce resultados más confiables de las condiciones de lluvia reales en la cuenca de estudio, por lo que se seleccionó para el diseño de las curvas IDF.

5.2.4 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia

Las curvas IDF y los valores de intensidad de lluvia obtenidos aplicando la fórmula de Chen se muestran en la Figura 32 y en la Tabla 30, respectivamente.

Tabla 30. Valores de intensidad de lluvia en mm/hr obtenidos de la fórmula de Chen y los mapas de isoyetas de la SCT.

Formula de Chen							Isoyetas SCT						
Duración (min)	Periodo de retorno (años)						Duración (min)	Periodo de retorno (años)					
	5	10	25	50	100	200		5	10	25	50	100	200
5	108.7	141.5	184.8	217.5	250.3	283.1	5	135.0	165.0	200.0	240.0	275.0	330.0
10	85.9	111.7	146.0	171.8	197.7	223.6	10	110.0	135.0	175.0	210.0	240.0	280.0
15	71.5	93.1	121.6	143.1	164.7	186.3	15	95.0	120.0	150.0	165.0	195.0	220.0
20	61.6	80.2	104.7	123.3	141.9	160.5	20	84.0	110.0	130.0	155.0	165.0	180.0
30	48.7	63.4	82.8	97.5	112.2	126.8	30	68.0	90.0	110.0	120.0	135.0	150.0
40	40.6	52.8	69.0	81.2	93.5	105.7	40	56.0	75.0	90.0	100.0	110.0	120.0
60	30.8	40.1	52.4	61.7	71.0	80.3	60	45.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0
90	23.1	30.0	39.2	46.1	53.1	60.0	90	33.0	40.0	55.0	60.0	70.0	70.0
120	18.6	24.2	31.6	37.2	42.9	48.5	120	26.0	33.0	40.0	47.5	55.0	60.0
150	15.7	20.4	26.7	31.4	36.2	40.9	150	21.0	27.0	34.0	40.0	45.0	51.0
180	13.7	17.8	23.2	27.3	31.5	35.6	180	17.0	22.0	28.0	33.0	37.0	42.0
210	12.1	15.8	20.6	24.3	27.9	31.6	210	15.0	19.0	24.0	28.0	31.0	36.0
240	10.9	14.2	18.6	21.9	25.1	28.4	240	13.0	16.0	22.0	25.0	28.0	31.0
480	6.3	8.2	10.7	12.6	14.5	16.4	480						
720	4.6	5.9	7.7	9.1	10.5	11.9	720						

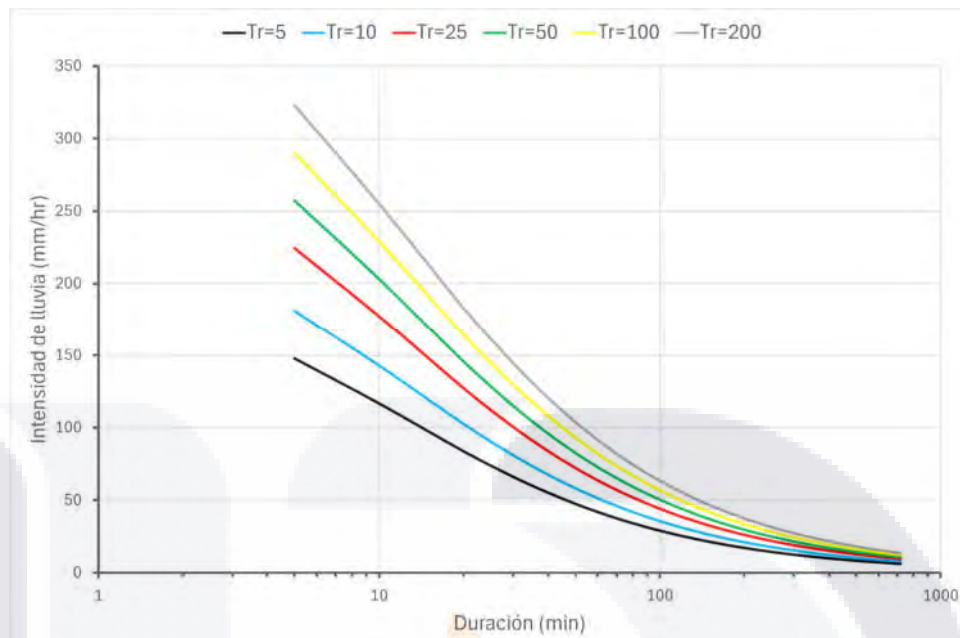


Figura 32. Curvas de intensidad-duración-frecuencia obtenidas aplicando la fórmula de Chen.

5.2.5 Hietogramas

Los hietogramas obtenidos con el método de bloques alternados se muestran en la Figura 33. Los valores de cada hietograma se incluyen en el Anexo 2, en las Tablas A5, A6 y A7.

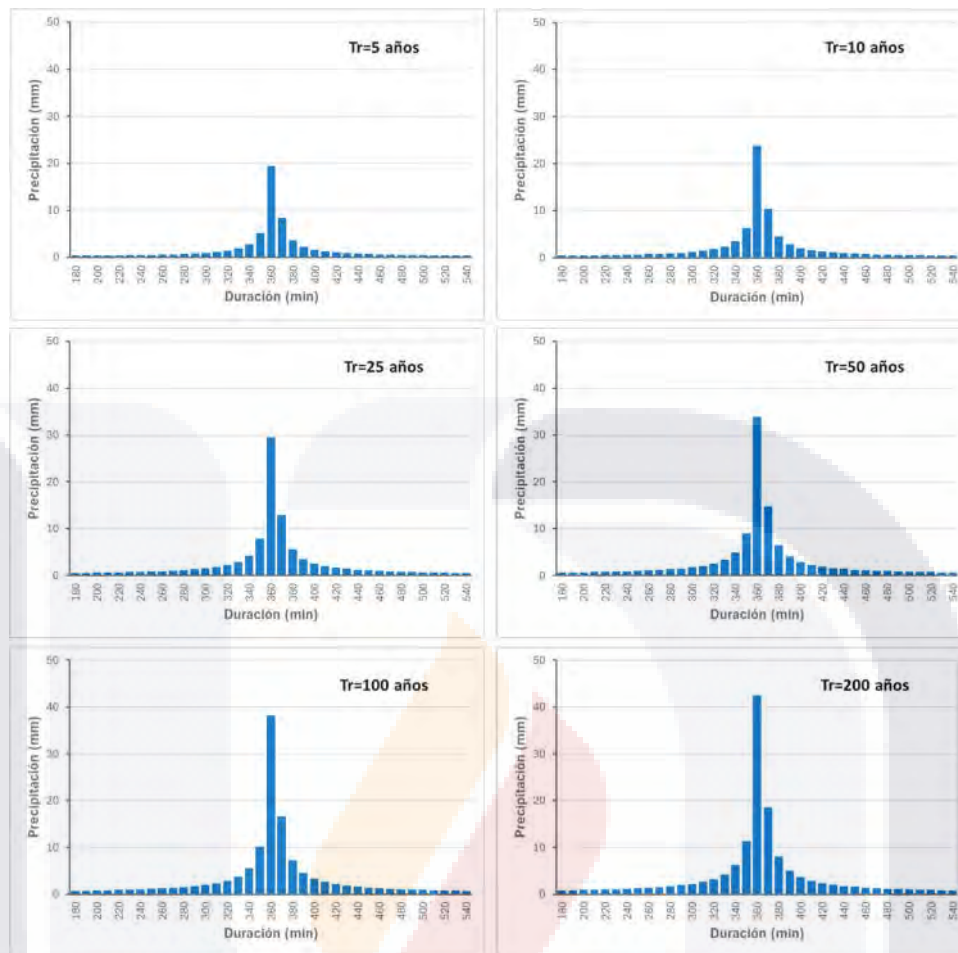


Figura 33. Hietogramas de precipitación obtenidos con el método de bloques alternados. El periodo de retorno (Tr) se indica en la parte superior derecha.

5.2.6 Hidrogramas

Los hidrogramas que se obtuvieron al realizar modelaciones hidrológicas en el programa HEC-HMS se muestran en la Figura 34. Los valores de cada hietograma se incluyen en el Anexo 3, en la Tabla A8.

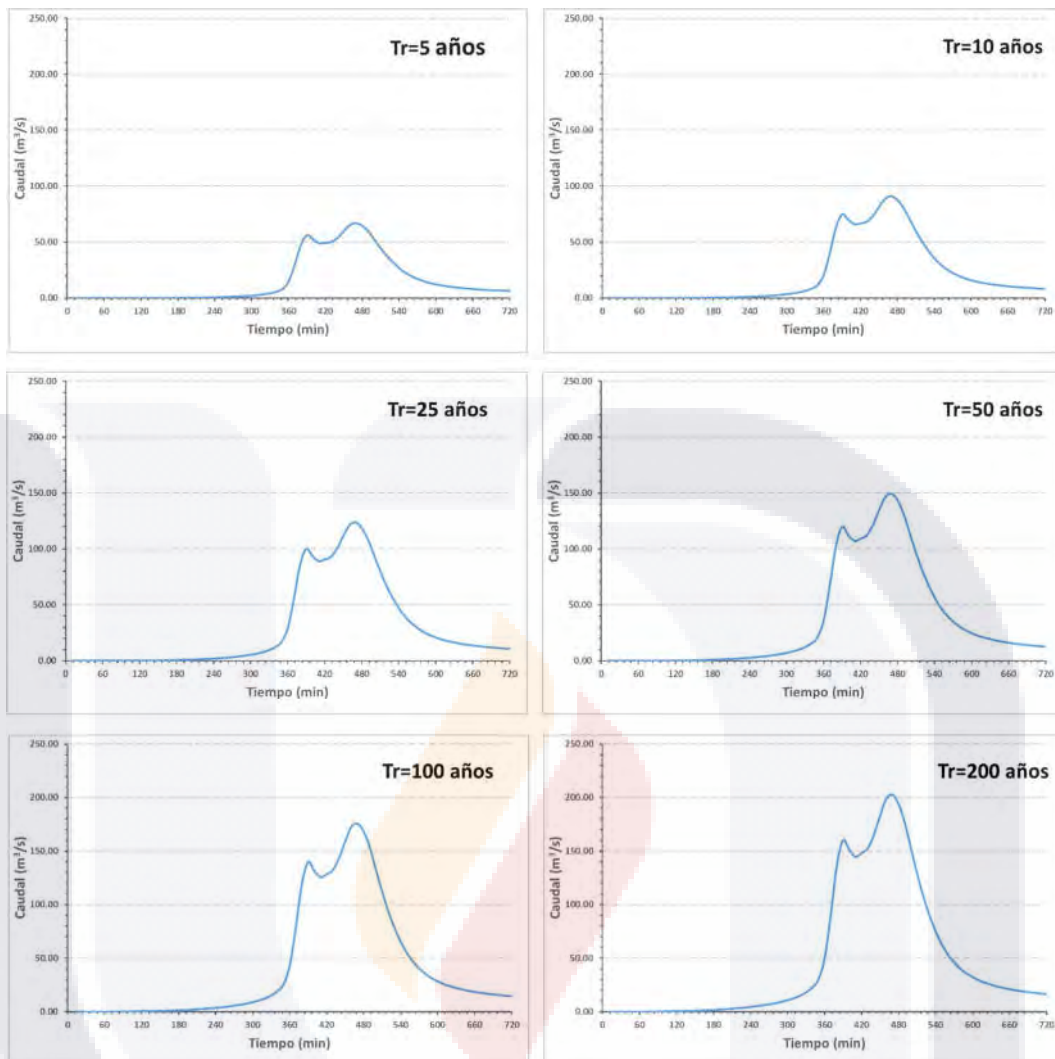


Figura 34. Hidrogramas calculados a la salida de la cuenca. El periodo de retorno (Tr) se indica en la parte superior derecha.

5.3 Modelación hidráulica

En esta sección se presentan los resultados relacionados con las modelaciones hidráulicas. Los datos topográficos y de uso de suelo se obtuvieron con técnicas de fotogrametría y GIS, a diferencia de los datos de uso de suelo de las modelaciones hidrológicas, donde se utilizó un método utilizando únicamente GIS. Se realizaron modelaciones hidráulicas para comparar la topografía obtenida con fotogrametría y la topografía de INEGI. Además, se realizó una modelación hidráulica para determinar el alcance del agua y la cantidad de sedimentos transportados.

5.3.1 Datos generados mediante técnicas de fotogrametría y GIS

Los resultados muestran el MDE obtenido mediante el procesamiento de datos y el MDE LiDAR de INEGI del año 2021. Los modelos tienen las siguientes características: área de 45.27 ha y dimensiones de 882.41 m de largo por 513.02 m de ancho. La resolución espacial de MDE Fotogrametría y MDE LiDAR es de 0.27 m y 1.5 m, respectivamente. Como puede verse en la Figura 35, la paleta de colores contiene rangos similares en ambos modelos, lo cual permite comparar y observar las diferencias en las elevaciones de los modelos. En este sentido, existen diferencias de 0.79 m y 3.11 m en los valores máximos y mínimos, respectivamente, lo cual puede deberse a que sólo se utilizó un dato de referencia para la alineación de las imágenes y no se realizó la calibración del sensor con más detalle.

Una parte de la topografía del cauce se perdió al eliminar los puntos de la vegetación alta, sobre todo en zonas donde la vegetación es muy densa. En estos casos será necesario obtener la topografía del cauce utilizando técnicas de medición directa, como receptor GPS o estación total. A pesar de lo anterior, se pudo generar un MDE con una resolución espacial de 0.27 m. La resolución temporal también fue mejor en el MDE fotogrametría, ya que logró captar los cambios que han surgido en la superficie analizada (MDE LiDAR es del año 2021), como la aparición de nuevas viviendas.

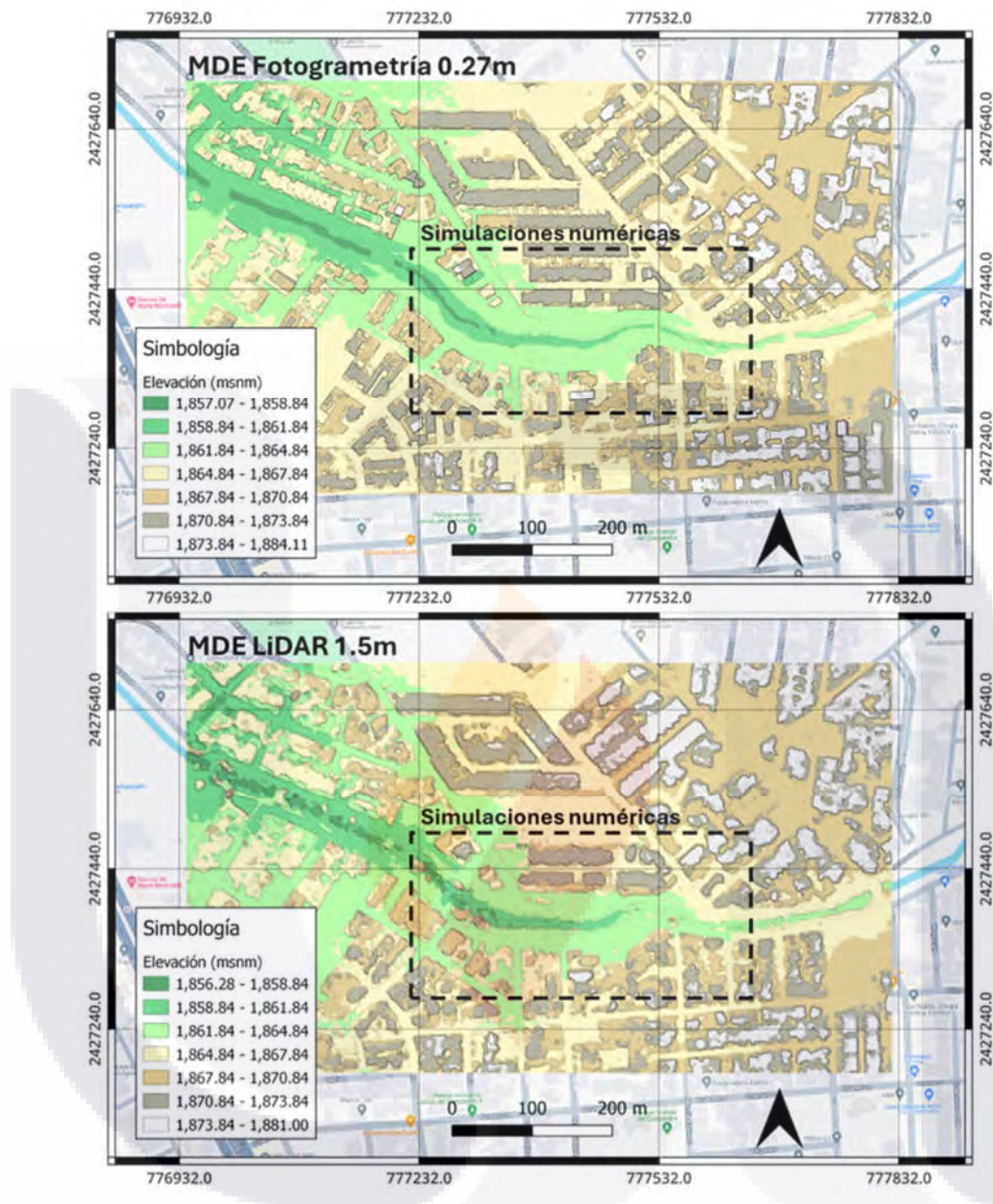


Figura 35. Arriba: MDE Fotogrametría 0.27 m. Abajo: MDE LiDAR INEGI 1.5 m. El área delimitada con líneas punteadas indica la ubicación del tramo donde se realizaron las simulaciones numéricas (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

La resolución del ortomosaico y el MCS es de 5.0 y 30.0 cm/píxel, respectivamente. En el caso del modelo de cobertura de suelo, se pudo obtener una clasificación con 5 tipos de cobertura, tal y como se muestra en la Figura 36.

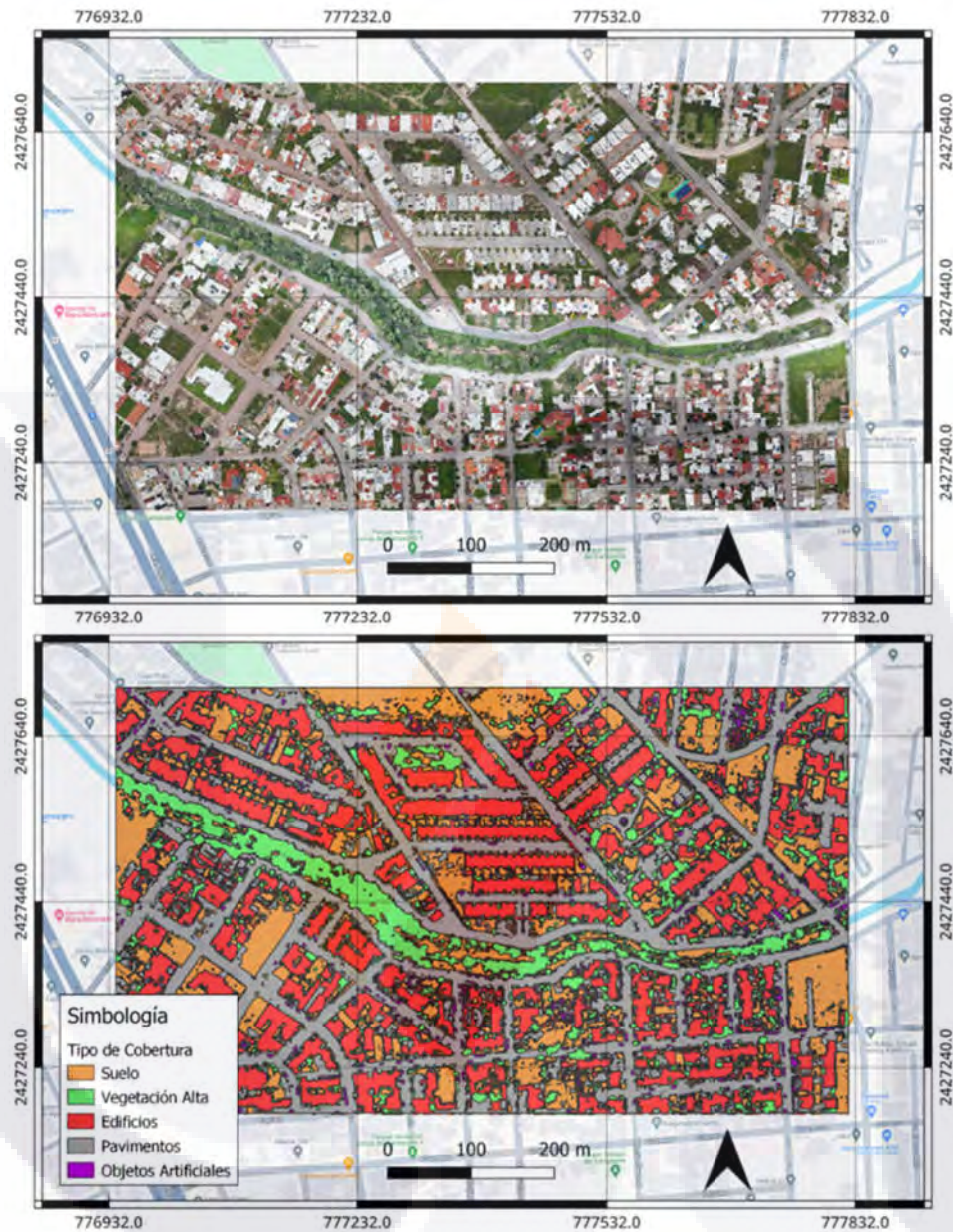


Figura 36. Modelos digitales derivados del procesamiento de datos. Arriba: Ortomosaico con resolución de 0.05 m. Abajo: Modelo de cobertura de suelo con resolución de 0.30 m (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

El MCS generado se puede considerar una nueva aportación, ya que no se tiene conocimiento de técnicas para generar la cobertura de suelo con alta resolución. Actualmente las imágenes satelitales de detección remota disponibles proporcionan mapas de cobertura de suelo con una resolución máxima de 10 metros, como en el caso de la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA).

CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados

6.1 Proceso de obstrucción por sedimentos en el concreto permeable

Los resultados numéricos demostraron una respuesta heterogénea de las muestras de concreto permeable bajo el flujo de partículas, dependiendo de las condiciones simuladas. Las Figuras 37 y 38 muestran los resultados de las simulaciones completadas para los escenarios 1 y 2, respectivamente, indicando la posición, trayectoria y velocidad de las partículas.

A partir de la simulación 1, mostrada en la Figura 37 se puede observar un predominio de tonos azules en los poros de los modelos, por lo que los rangos más predominantes en las velocidades de las partículas varían de 0 a 11.5 mm/s. Específicamente para la simulación 1 donde se utilizó el material I, todas las partículas quedaron atrapadas aproximadamente 70 mm por encima del fondo del modelo, ocurriendo esto después de 40 segundos de simulación. Como resultado, ninguna partícula alcanzó la salida del modelo en la simulación 1. Además, la velocidad de los sólidos en esta simulación es la más lenta, por lo que solo dos pasos ($t = 12$ s y $t = 40$ s) fueron suficientes para mostrar los resultados. Recordemos que el material I correspondió a las arenas de mayor diámetro.

Los resultados para la simulación 2 con el material II muestran que después de 17 segundos, una primera fracción de las partículas sale del modelo por uno de los poros, y después de 25 segundos, una segunda fracción de las partículas sale por los poros restantes. Este retraso diferencial de 8 segundos posiblemente está favorecido por la tortuosidad y bifurcaciones de los poros, que provocan la reducción en la velocidad del movimiento de las partículas. Este retraso en la salida de las partículas en algunos poros también se observa en las simulaciones 3 a 6. Al final de la simulación 2 ($t = 60$ s), se observa que el atrapamiento de partículas ocurre en las secciones de poros que presentan mayor tortuosidad en el modelo.

En la simulación 3, que utiliza el material III con diámetros de partículas de 0.3 a 0.6 mm, hay diferentes características a discutir a través de los pasos. Por ejemplo, las partículas alcanzan la velocidad máxima de 23.7 mm/s en el paso 1, mientras que en el paso 3 ($t = 30$ s) se han acumulado más partículas en los poros que en la simulación 2, donde se observan más espacios porosos vacíos. De manera similar, en el paso 4, al final de la simulación ($t = 70$ s), se observaron menos partículas atrapadas en comparación con las simulaciones 1 y 2.

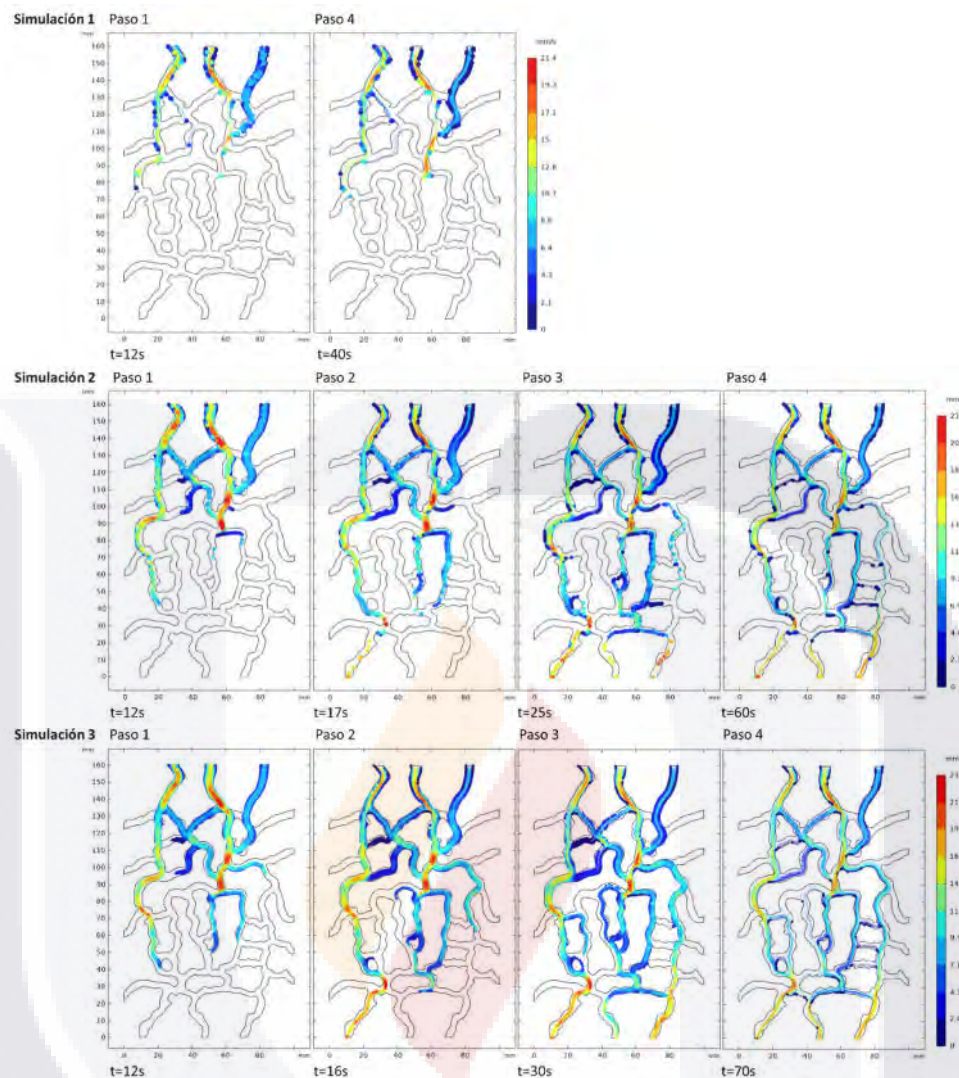


Figura 37. Posición, trayectoria y velocidad de las partículas sólidas en las simulaciones 1 a 3 para el escenario 1. Se muestra el tiempo actual y la velocidad de filtración utilizada en estas simulaciones es 8.98 mm/s (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

En el Escenario 2, que se muestra en la Figura 38, los colores azules vuelven a ser dominantes en los poros, pero a diferencia del Escenario 1, bajo estas nuevas condiciones predominan los azules oscuros como resultado de una reducción en la velocidad de filtración simulada. Bajo este escenario, algunas partículas alcanzan la salida del modelo para las 3 simulaciones. Esto es relevante para el rendimiento del concreto permeable porque cuantas más partículas llegan a la salida, menos probable es que se obstruyan los poros. Con respecto a las observaciones para cada una de las simulaciones en este escenario, se puede discutir, por ejemplo, que el valor más alto en velocidades

de partículas (zonas rojas, 7.28 mm/s), se logró en algunos poros de la simulación 6 donde se utilizaron partículas del material III en las simulaciones.

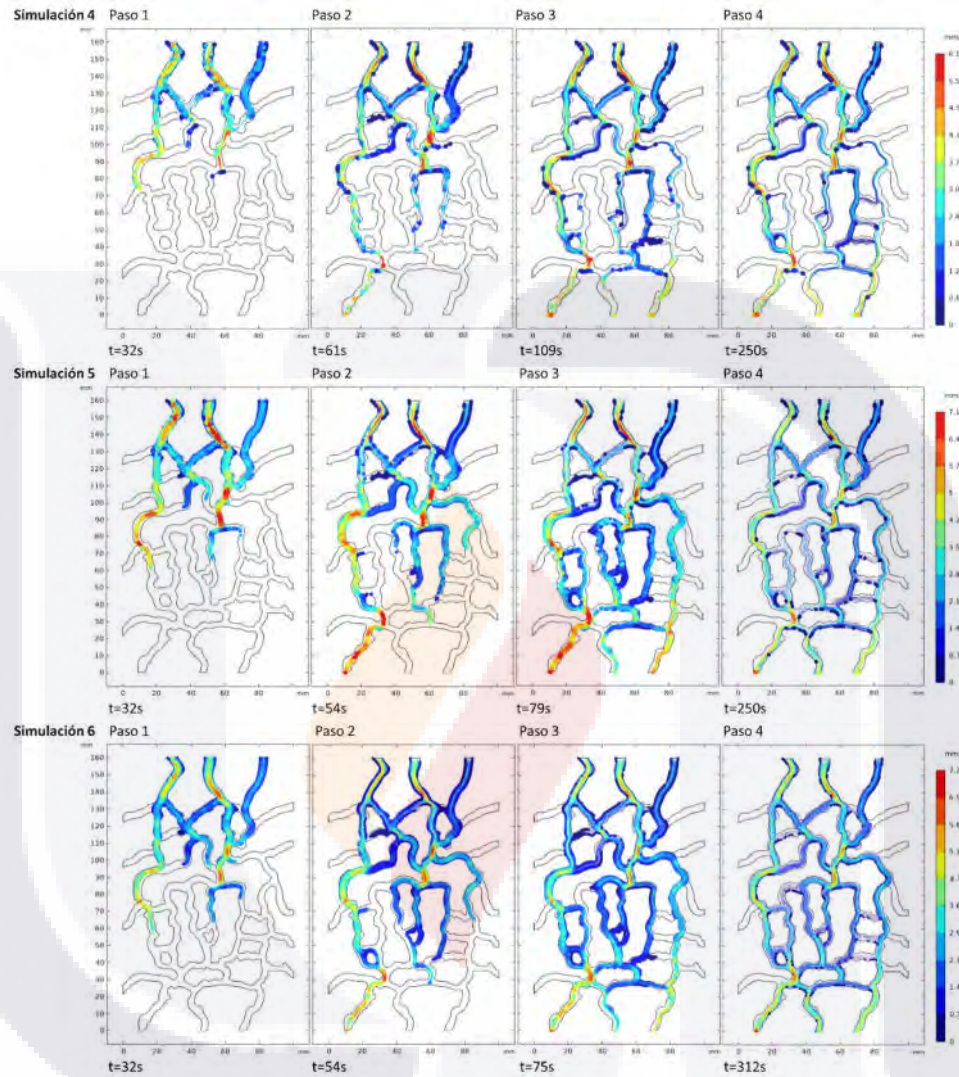


Figura 38. Posición, trayectoria y velocidad de partículas sólidas en las simulaciones de prueba 4 a 6 para el escenario 2. Se muestra el tiempo actual y la velocidad de filtración utilizada en este escenario fue de 2.43 mm/s (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

En las simulaciones 1 y 2 del escenario 2, las partículas alcanzaron la salida del modelo al mismo tiempo ($t = 240$ s), aunque se simularon materiales diferentes (I y II). En cuanto al tiempo necesario para completar los pasos, cabe señalar que, en general, las simulaciones en el escenario 2 necesitaron más tiempo para completar los pasos que las del escenario 1. Por ejemplo, el paso 2 se completó en 54 y 61 segundos en el escenario 2, mientras que el escenario 1 necesitó 16 y 17

segundos para completarlo. Recordemos que el paso 2 finalizó cuando las partículas alcanzaron la salida del modelo en un tubo de poros.

En general, los resultados del modelado demuestran que el porcentaje de partículas atrapadas en el escenario 2 es mayor que en el escenario 1, como se observa en la Figura 39. Esto implica que una velocidad de filtración reducida, como la simulada en el escenario 2, resulta en una mayor obstrucción, contradiciendo de alguna manera el hecho de que las partículas llegaron a la salida del modelo en todas las simulaciones del escenario 2. Este comportamiento dinámico se puede explicar físicamente de la siguiente manera: una baja velocidad de filtración produce una baja fuerza de arrastre, sin embargo, la fuerza de gravedad junto con la ausencia de fuerzas de fricción permite que las partículas se muevan distancias más largas y, por lo tanto, lleguen a la salida del modelo. Además, un flujo más turbulento, como el simulado con un valor más alto de velocidad de filtración, favorece el atrapamiento de partículas.

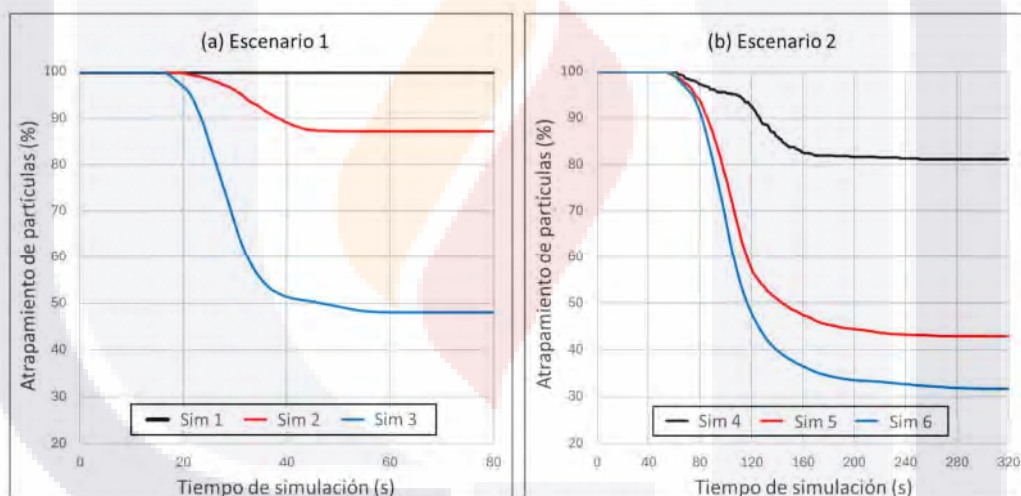


Figura 39. Variación del porcentaje de partículas atrapadas en las simulaciones. Las simulaciones comienzan con un atrapamiento del 100 % a medida que las partículas se liberan en el modelo. Una vez que las partículas se liberaron por completo, el porcentaje comenzó a disminuir. De hecho, el tiempo de simulación en el que las líneas (excepto en la simulación 1) ya no son horizontales corresponde al tiempo al final del paso 2 (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025a).

El modelado numérico también revela el papel del tamaño de grano en la obstrucción, ya que cuanto mayor es el tamaño de la partícula mayor es el porcentaje de atrapamiento, como se muestra en la

Figura 39, donde las simulaciones utilizando el material I (simulaciones 1 y 4) presentaron el mayor valor de obstrucción. Por el contrario, las simulaciones con el material III (simulaciones 3 y 6), correspondientes al tamaño de partícula más fino, permitieron que salieran más partículas del modelo. Sin embargo, al comparar simulaciones para el mismo material en ambos escenarios, por ejemplo, Simulación 1 vs. Simulación 4, se puede observar que una menor velocidad de filtración de las partículas resulta en un mayor porcentaje de atrapamiento.

6.2 Datos de entrada para la modelación de inundaciones

6.2.1 Datos de permeabilidad del suelo

Los valores de permeabilidad que se determinaron directamente en campo corresponden a depósitos no consolidados de arena y arena limosa, de acuerdo con los rangos de permeabilidad reportados por Freeze y Cherry (1979).

La Figura 40 muestra una sección de la carta geológica F-13-D-19 de Aguascalientes del año 1973 que corresponde al área de estudio hidrológica. La carta geológica indica que la parte cercana al arroyo corresponde a un suelo de tipo aluvial, mientras que el resto corresponde a depósitos de rocas sedimentarias de arenisca y conglomerado. Esta clasificación concuerda con lo observado durante las pruebas de campo, ya que al momento de excavar el pozo para insertar el permeámetro se pudieron identificar suelos arenosos con presencia de grava. Las permeabilidades más altas se obtuvieron a las zonas cercanas al cauce del arroyo, lo que sugiere que estos suelos aluviales favorecen la recarga de agua. Asimismo, en la Figura 41 se muestra una sección de la carta edafológica F-13-D-19, la cual indica que el suelo en la zona es principalmente de tipo phaeozem háplico Hh, que corresponde a suelos porosos de color oscuro, utilizados en la agricultura por su característica de fertilidad.

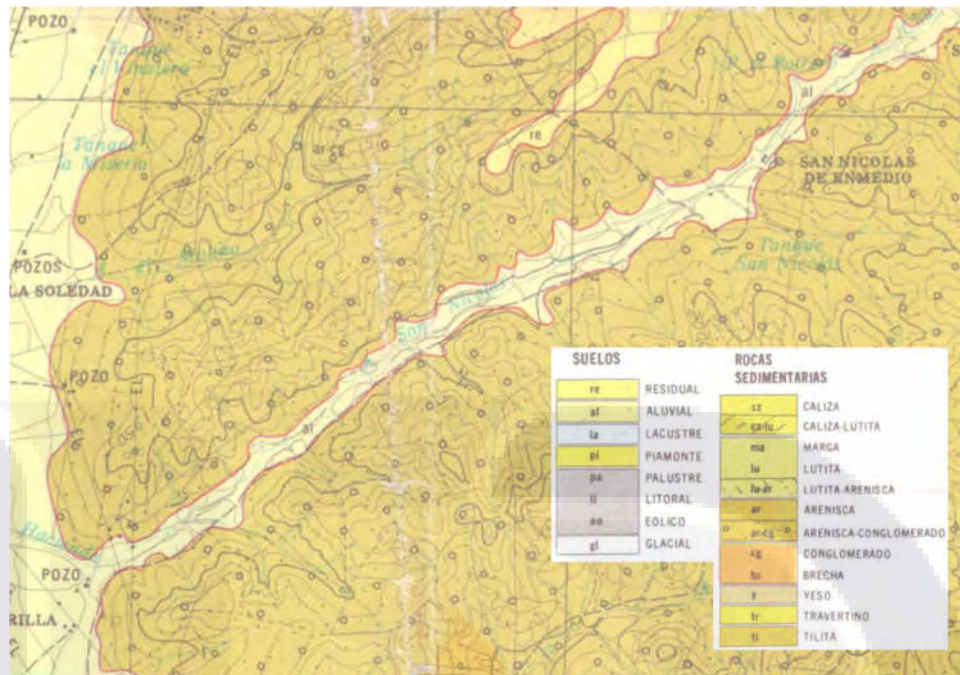


Figura 40. Carta geológica de la sección del área hidrológica que muestra los tipos de suelo y roca existentes (Tomado de INEGI, 1973).

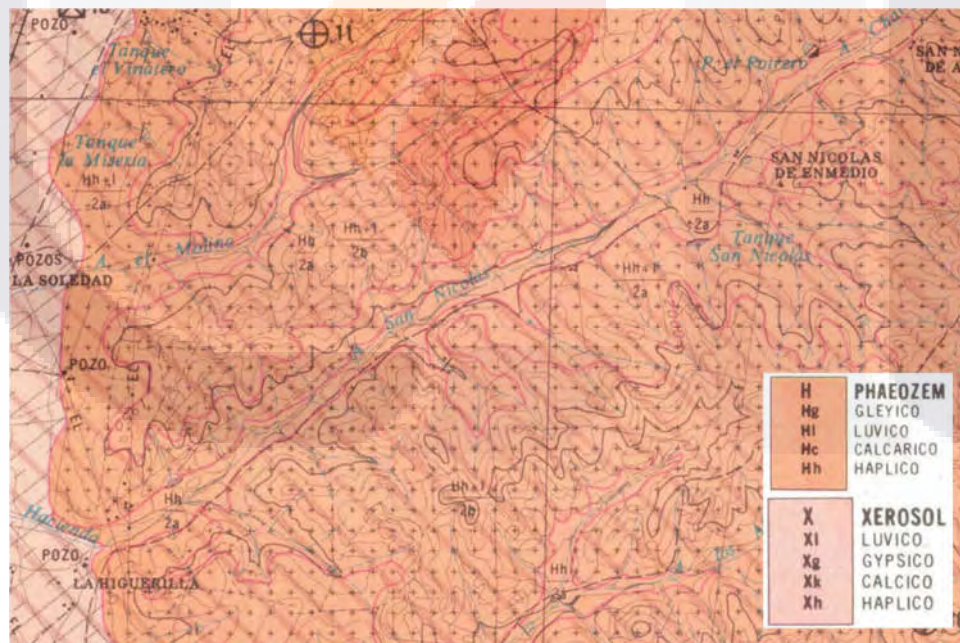


Figura 41. Carta edafológica de la sección del área hidrológica que muestra los tipos de unidades edafológicas existentes (Tomado de INEGI, 1973).

6.2.2 Datos topográficos

Las simulaciones numéricas de la Figura 42 muestran una comparativa de desempeño al determinar las profundidades de inundación entre el MDE creado con técnicas de fotogrametría y GIS, y el MDE LiDAR de INEGI. Para realizar la comparativa entre los MDEs antes mencionados, se utilizó la misma geometría y condiciones de frontera. Los tonos de azul claro corresponden a profundidades o niveles de agua moderados de entre 0 a 0.50 m, mientras que los tonos de azul oscuro indican valores extremos mayores a 0.50 m. La mayor resolución disponible actualmente en los MDEs de INEGI es de 1.5 m, por lo que a la escala que se presentan los resultados ya puede verse una diferencia de resolución espacial entre ambos modelos.

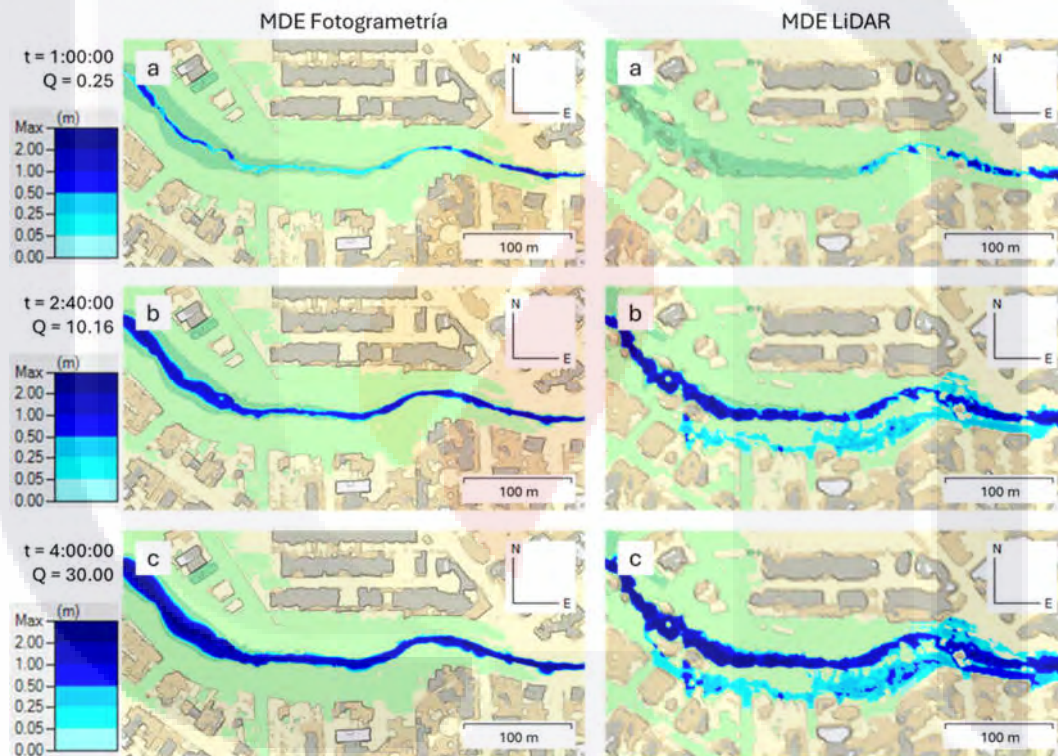


Figura 42. Profundidades y extensión de inundación determinadas mediante simulaciones numéricas en HEC-RAS para los MDEs obtenidos de fotogrametría y LiDAR. En cada fila, t indica el tiempo de simulación en horas, minutos, segundos, y Q es el caudal en m³/s (Tomado de Vizcaíno-López et al., 2025b).

Las simulaciones comienzan con un tiempo cero (t = 00:00:00), considerando un escenario en el que el arroyo se encuentra sin agua. Luego, en la Figura 42a puede verse que el alcance del agua es distinto en ambos modelos después de 1 hora y manteniendo un caudal constante de 0.25 m³/s, ya

que en MDE Fotogrametría el agua ya ha recorrido todo el cauce y ha llegado hasta la salida, mientras que en el MDE LiDAR el agua apenas ha recorrido un tramo del cauce. Esto se debe a las diferencias topográficas que existen en ambos modelos y a que en MDE LiDAR existen depresiones u hoyos de cierta profundidad que tardan más tiempo en llenarse, lo cual retarda el avance del agua.

Los resultados muestran que en el MDE Fotogrametría tiene un mejor desempeño, ya que al simular caudales de alrededor de 10 m³/s no deberían de existir desbordamientos en el arroyo, como ocurre en el caso de MDE LiDAR (ver Figura 42b). Los desbordamientos prematuros son consecuencia de irregularidades o imprecisiones en la topografía del cauce en el MDE LiDAR, las cuales provocan cambios bruscos de dirección en el flujo de agua que no existen en condiciones reales.

La Figura 42c muestra el tiempo donde se alcanza el pico del hidrograma. El MDE Fotogrametría sigue indicando que no habrá desbordamientos, mientras que en MDE LiDAR se pueden observar áreas inundadas con profundidades mayores a 0.5 m. Al observar el MDE LiDAR también se pueden observar algunos puntos aislados con profundidades mayores a 0.5 m en zonas que corresponden a calles pavimentadas, lo cual sugiere que se crearon irregularidades e imprecisiones a pesar de que dicho modelo fue creado utilizando una técnica de escaneo láser. Estas depresiones en el terreno pueden afectar los resultados al determinar el alcance de una inundación, por lo que se deben analizar a mayor detalle.

De acuerdo con la documentación disponible (INEGI, 2024), la exactitud de los valores de los DEMs tipo LiDAR es de 0.15 a 0.90 metros, pero esta información es superficial y no se encontraron estudios que la hayan validado.

6.3 Modelación hidráulica de inundaciones

Con los datos obtenidos mediante las metodologías propuestas en este estudio es posible desarrollar el modelo numérico de inundaciones de la Figura 43, que muestra el alcance del agua y los sedimentos. El modelo de inundaciones se puede mejorar realizando la validación y calibración, ya que esto permitiría saber si los resultados representan adecuadamente la realidad. La validación permitiría comprobar la confiabilidad y precisión de los resultados, mientras que la calibración puede ayudar a ajustar los parámetros del modelo para que los resultados sean lo más cercanos a la realidad.

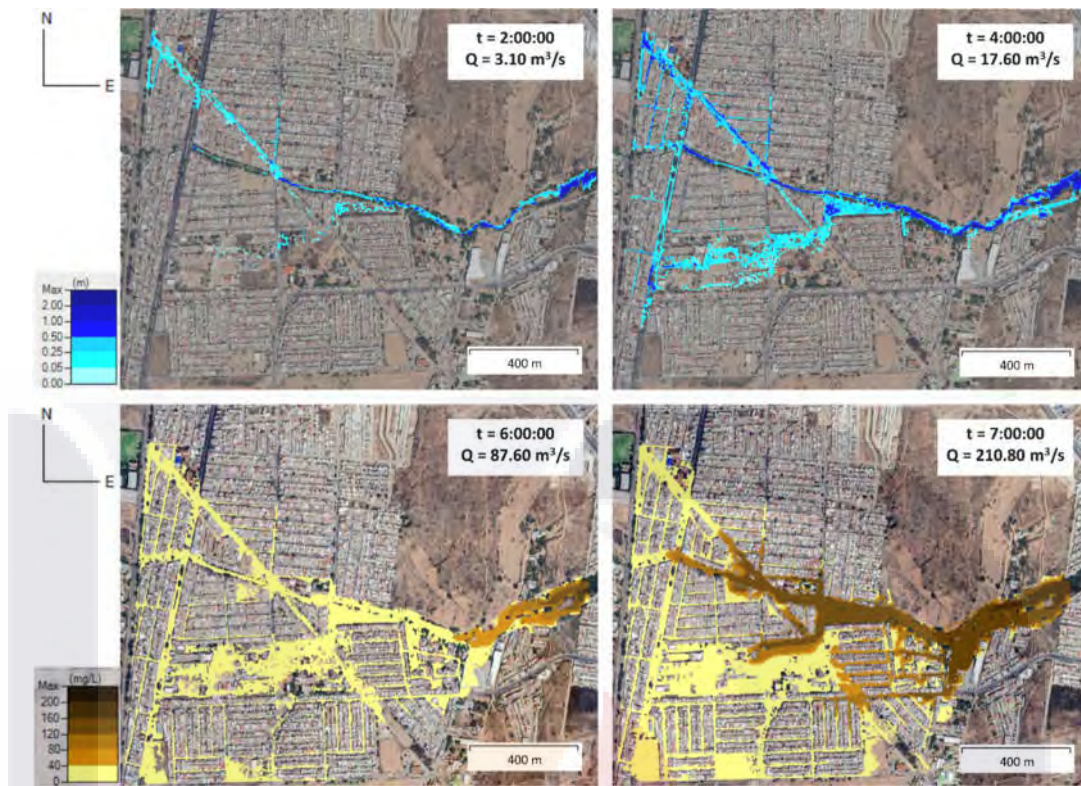


Figura 43. Modelación hidráulica en HEC-RAS. La parte superior muestra las variables de profundidad y alcance de inundación. La parte inferior muestra las variables de alcance y concentración de sedimentos. El recuadro superior derecho indica el tiempo y el caudal simulado.

CAPÍTULO VII: Conclusiones

La presente tesis presenta análisis y técnicas que permiten superar la escasez de datos en la cuenca analizada y mejorar la precisión de los resultados de simulación numérica.

La zona urbana que se encuentra dentro del área hidrológica de la cuenca tiene el potencial de poder ser utilizada para la instalación de sistemas de infiltración de agua, ya que esto puede ayudar a reducir los efectos de las inundaciones en la zona de inundación ubicada aguas abajo. Algunos sistemas de infiltración que son susceptibles a la obstrucción por sedimentos, como es el caso de las zanjas de infiltración y el concreto permeable, no se deben aplicar en las zonas inundadas **que se** muestran en el mapa de la Figura 43, ya que las escorrentías transportan sedimentos y esto provocará la falla de estos sistemas de infiltración.

Mediante el uso del permeámetro tipo Pask, es posible determinar en campo el parámetro de conductividad hidráulica saturada del suelo, dato que luego se utiliza para inferir el grupo hidrológico del suelo correspondiente dentro de la cuenca analizada.

Al realizar las simulaciones numéricas bidimensionales para comparar el desempeño del MDE obtenido con técnicas de fotogrametría y GIS con el MDE LiDAR de INEGI del año 2021, los resultados muestran que la resolución y topografía de puntos obtenida en el MDE de fotogrametría es más adecuada y tiene un mejor desempeño en el análisis numérico de inundaciones, cuando se requiere estudiar cuencas pequeñas en zonas urbanas, con la condición de que se mejore la precisión de las elevaciones verticales de los puntos y el error sea el mínimo posible.

Investigación Futura

Los datos topográficos disponibles actualmente para realizar modelaciones numéricas de inundaciones no están validados, por lo que no se sabe cuál es la precisión de los puntos contenidos en los modelos digitales de elevación de libre acceso. La investigación futura debería atender esta cuestión, ya que si el modelo numérico no logra representar adecuadamente las elevaciones del terreno en el entorno urbano, los pronósticos emitidos por los modelos numéricos no serán confiables. Se debe trabajar en una técnica viable que permita obtener una topografía adecuada con el error mínimo posible en los puntos verticales. Además, en zonas donde existe mucha vegetación, no será posible obtener la topografía del terreno con técnicas de fotogrametría, por lo que se deberán utilizar GPS u otros dispositivos de detección remota para superar esta limitación.

La escasez de datos sobre la variación de las crecientes y los caudales máximos que se presentan durante los eventos de lluvia y las inundaciones también sigue siendo un desafío latente en zonas urbanas, ya que los arroyos generalmente no cuentan con estaciones que lleven a cabo un monitoreo hidráulico. Estos datos son indispensables para validar y calibrar los hietogramas e hidrogramas que se pueden obtener con modelaciones hidrológicas, por lo que se debe buscar un método para obtener dichos datos, ya que esto incrementará la confiabilidad de los modelos numéricos de inundaciones.



REFERENCIAS

- ACI American Concrete Institute. (2010). *522R Report on pervious concrete*. Farmington Hills.
- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., & Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 1577-1605. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0509-y>
- Agisoft. (2022). *Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.8*. Agisoft Limited Liability Company. <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals>
- Allaire, G. (2007). Numerical Analysis And Optimization: An introduction to mathematical modelling and numerical simulation. Oxford Academic. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199205219.003>
- Andres-Valeri, V., Juli-Gandara, L., Jato-Espino, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2018). Characterization of the infiltration capacity of porous concrete pavements with low constant head permeability tests. *Water*, 10–4, 480. <https://doi.org/10.3390/w10040480>.
- ASTM American Society for Testing and Materials. (2000). *C192 Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. West Conshohocken
- ASTM American Society for Testing and Materials. (2007). *C127 Standard test method for density, relative density, and absorption of coarse aggregate*. West Conshohocken
- ASTM American Society for Testing and Materials. (2019). *C140 Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units*. West Conshohocken
- Ayuntamiento de Aguascalientes. (25 de junio de 2018). *Boletín No. 869 Aguascalientes de Pie*. <https://www.ags.gob.mx/cont.aspx?p=5869>
- Azizi, K., Kofi, D. S., Saija, L., Zamani, M.G., & Meier, C.I. (2022). Integrated community-based approaches to urban pluvial flooding research, trends and future directions: A review. *Urban Climate*, 44, 101237. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101237>
- Bang, H. N., & Burton, N. C. (2021). Contemporary flood risk perceptions in England: Implications for flood risk management foresight. *Climate Risk Management*, 32, 100317. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100317>
- Beven, K. J. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell

- Brischke, C. & Humar, M. (2017). Performance of the bio-based materials. En D. Jones y C. Brischke (Eds.), *Performance of Bio-based Building Materials* (pp. 249-333). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100982-6.00005-7>
- Brunner, M. I., Slater, L., Tallaksen, L. M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), e1520. <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>
- Bulti, D.T., & Abebe, B.G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Model. Earth Syst. Environ.*, 6, 1293–1302. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>
- Burn, D. H., Castellarin, A., & Kjeldsen, T. R. (2017). Floods. In Singh, V. P. (Ed.) *Handbook of Applied Hydrology* (2nd Ed, chapter 75). Mc Graw Hill
- Busson, F. (18 de junio de 2023). *Proyectan sistema urbano de drenaje sustentable*. El Sol del Centro. <https://oem.com.mx/elsoldelcentro/local>
- Cahyono, C., & Adidarma, W.K. (2019). Influence analysis of peak rate factor in the flood events' calibration process using HEC–HMS. *Model. Earth Syst. Environ.* 5, 1705–1722. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00625-8>
- Campos-Aranda, D.F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico Vol. 1*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos-Aranda, D. F. (2010). Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2), 179-188. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432010000200005&script=sciarttext>
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review. *Hydrology*, 9(3), 50. <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>
- Cea, L., Sañudo, E., Montalvo, C., Farfán, J., Puertas, J., & Tamagnone, P. (2025). Recent advances and future challenges in urban pluvial flood modelling. *Urban Water Journal*, 22(2), 149–173. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2446528>

- Chen, C. L. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1603-1621. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:12\(1603\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:12(1603))
- Chien, N. & Wan, Z. (1999). *Mechanics of Sediment Transport*. American Society of Civil Engineers
- Chow, V. T., Maidment, D.R., & Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology - International Edition*. McGraw Hill
- CONAGUA Comisión Nacional del Agua. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - Drenaje Pluvial Urbano*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>
- Das B.M., & Sobhan K. (2014). *Principles of geotechnical engineering - SI edition*. Cengage Learning
- Dendrou, S.A. (1982). Overview of Urban Stormwater Models. En, D.F. Kibler (ed.), *Urban Stormwater Hydrology* (Volume 7, pp. 219-247). American Geophysical Union, Water Resources Monograph Series. <https://doi.org/10.1029/WM007p0219>
- Devi, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- DJI Da-Jiang Innovations. (2022). *DJI Air 3 User Manual v1.0*. DJI Sciences and Technologies. <https://dl.djicdn.com/downloads>
- Dynamic Monitors. (2022). ETC Pask (constant head well) permeameter user guide for in-situ measurement of soil field saturated hydraulic conductivity. Engineering Technologies Canada Ltd. <https://dynamicmonitors.com>
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of the Total Environment*, 607, 413-432. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>
- Efthimiou, N. (2019). The role of sediment rating curve development methodology on river load modeling. *Environmental monitoring and assessment*, 191, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7167-4>
- Eisenberg, B., Lindow, K. C., & Smith, D. R. (2015). *Permeable Pavements*. American Society of Civil Engineers.

- Elrick, D.E., & W.D. Reynolds. (1986). An analysis of the percolation test based on three dimensional saturated-unsaturated flow from a cylindrical test hole. *Soil Science*. 42:308-321. https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1986/11000/an_analysis_of_the_percolation_test_based_on.9.aspx
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall Inc.
- Funke, F., & Kleidorfer, M. (2024). Sensitivity of sustainable urban drainage systems to precipitation events and malfunctions. *Blue-Green Systems*, 6(1), 33-52. <https://doi.org/10.2166/bgs.2024.046>
- Gómez-Balmaceda, E., López-Ramos, A., Martínez-Acosta, L., Medrano-Barboza, J. P., Remolina López, J. F., Seingier, G., Daesslé, L. W., & López-Lambraño, A. A. (2020). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationship. Case Study: Depth-Duration Ratio in a Semi-Arid Zone in Mexico. *Hydrology*, 7(4), 78. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040078>
- Godara, N., & Bruland, O. (2019). Choosing an Appropriate Hydrologic Model. *Indian Institute of Technology Roorkee*. <https://www.iitr.ac.in/rwc2020>
- Guerrero-Martínez, L., Hernández-Marín, M., & Burbey, T. J. (2018). Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 268-276. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.1022>
- HEC-HMS Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System. (2024). *Technical Reference Manual*. United States Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm>
- HEC-RAS (6 de octubre de 2024) *Hydraulic Reference Manual - Downstream Boundary Condition Considerations*. United States Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil>
- Hernández-Marín, M., Guerrero-Martínez, L., Zermeno-Villalobos, A., Rodríguez-González, L., Burbey, T. J., Pacheco-Martínez, J., ... & González-Cervantes, N. (2018). Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2811-2826. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>

- Hill, B., Liang, Q., Boshier, L., Chen, H., & Nicholson, A. (2023). A systematic review of natural flood management modelling: Approaches, limitations, and potential solutions. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3), e12899. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfr3.12899>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1973). *Carta geológica y edafológica de Aguascalientes, escala 1:50,000*. <https://www.inegi.org.mx/temas/>
- INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (12 de octubre de 2024). *Modelos Digitales de Elevación - Descripción*, <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/relieve/continental>
- IMPLAN Instituto Municipal de Planeación. (2015). *Programa de Desarrollo Urbano de la Ciudad de Aguascalientes 2040 Ciudad que Evolucionara*. <https://www.implanags.gob.mx/files>
- Jain, S. K., Mani, P., Jain, S. K., Prakash, P., Singh, V. P., Tullos, D., & Dimri, A. P. (2018). A Brief review of flood forecasting techniques and their applications. *International journal of river basin management*, 16(3), 329-344. <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1411920>
- Jehanzaib, M., Ajmal, M., Achite, M., & Kim, T. W. (2022). Comprehensive review: Advancements in rainfall-runoff modelling for flood mitigation. *Climate*, 10 (10), 147. <https://doi.org/10.3390/cli10100147>
- Jodhani, K. H., Patel, D., & Madhavan, N. (2023). A review on analysis of flood modelling using different numerical models. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3867-3876. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.405>
- Kassab G. (10 de enero de 2025). *Identifying the right numerical modeling approach*. Hatch. <https://www.hatch.com/About-Us/Publications/Blogs/2023/05>
- Kia, A., Wong, H. S., & Cheeseman, C. R. (2017). Clogging in permeable concrete: A review. *Journal of Environmental Management*, 193, 221-233. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.018>
- Knapp, H. V., Durgunoğlu, A., & Ortel, T. W. (1991). *A Review of Rainfall-Runoff Modeling for Stormwater Management* (Contract Report CR 516). Illinois State Water Survey. <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/cr/iswscr-516>
- Koutsoyiannis D., & Papalexiou S.M. (2017). Extreme rainfall: Global perspective. En Singh V. P. (Ed.) *Handbook of applied hydrology 2nd ed.* (Chapter 74). McGraw-Hill.

- Kumar, V., Sharma, K. V., Caloiero, T., Mehta, D. J., & Singh, K. (2023). Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances. *Hydrology*, 10(7), 141. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070141>
- Kuzma, S., & Luo, T. (23 de abril de 2020). *The Number of People Affected by Floods Will Double Between 2010 and 2030*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/number-people-affected-floods-will-double-between-2010-and-2030>
- Kwast, H. & Menke, K. (2020). *QGIS for Hydrological Applications: Recipes for Catchment Hydrology and Water Management*. Locate Press LLC
- Larson, M. (2005). Numerical Modeling. En M.L. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 730-733). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_232
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., & Paulus, J.M.H. (1977) *Hidrología para ingenieros*. Mc Graw Hill.
- Linham, M. M. & Nicholls, R. J. (2010). Pronóstico de sistemas de alerta temprana - Sistemas de prevención de inundaciones. United Nations Environment Programme. <https://www.ctc-n.org/technology-library/early-warning-systems-forecasting/flood-forecasting-systems>
- Liu, T., Lawluy, Y., Shi, Y., & Yap, P. S. (2021). Low impact development (LID) practices: A review on recent developments, challenges and prospects. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(9), 344. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05262-5>
- Luo, P., Luo, M., Li, F., Qi, X., Huo, A., Wang, Z., He, B., Takara, K., Nover D. & Wang, Y. (2022). Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives. *Environmental Modelling and Software*, 156, 105478. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105478>
- Martínez-Martínez, S.I. (2017). *Introducción a la hidrología superficial (Segunda edición)*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Meng, X., Zhang, M., Wen, J., Du, S., Xu, H., Wang, L., & Yang, Y. (2019). A simple GIS-based model for urban rainstorm inundation simulation. *Sustainability*, 11(10), 2830. <https://doi.org/10.3390/su11102830>
- Mockus, V. (1961). *Watershed lag*. United States Department of Agriculture ES-1015. Soil Conservation Service

- Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Arias-Hidalgo, M., Domínguez-Granda, L., Apolo-Masache, B., & Carrión-Mero, P. (2022). Flood Models: An Exploratory Analysis and Research Trends. *Water*, 14(16), 2488. <https://doi.org/10.3390/w14162488>
- Musolino, G. D. (2021). *Flood Modelling and Hazard Assessment for Extreme Events in Riverine Basins* [Tesis Doctoral]. Universidad de Cardiff.
- Nelson, A., Gibson, S. A., y Sanchez, A. (2022). Development of a two-dimensional HEC-RAS sediment model for the Chippewa River, Wisconsin, for software development and sediment trend analysis – Report ERDC/TN RSM-20-8. Engineer Research and Development Center. <https://www.erdcl.usace.army.mil/Media/Publication-Notices/Article/2368006>
- Nkwunonwo, U. C., Whitworth, M., & Baily, B. (2020). A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, 7, e00269. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>.
- NRCS National Resources Conservation Service. (2004). Hydrology National Engineering Handbook Part 630 - Chapter 9: Hydrologic Soil Cover Complexes. United States Department of Agriculture. <https://www.hydrocad.net/neh/630contents.htm>
- NRCS National Resources Conservation Service. (2009). Hydrology National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. United States Department of Agriculture. <https://www.hydrocad.net/neh/630contents.htm>
- NRCS National Resources Conservation Service. (2010). Hydrology National Engineering Handbook Part 630 - Chapter 15: Time of Concentration. United States Department of Agriculture. <https://www.hydrocad.net/neh/630contents.htm>
- Ortiz, S. (8 de noviembre de 2024). ¿Sabías que el Río San Pedro cruza Aguascalientes de norte a sur? Descubre su recorrido y afluentes. *El Sol del Centro*. <https://oem.com.mx/elsoldelcentro/local/en-aguascalientes-tenemos-un-rio-sabes-cuanto-mide-y-en-donde-desemboca>
- Pechlivanidis, I. G., Jackson, B. M., McIntyre, N. R., & Wheeler, H. S. (2011). Catchment Scale Hydrological Modelling: A Review of Model Types, Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and Applications. *Global NEST Journal*, 13(3), 193-214. <https://journal.gnest.org/publication/778>

- Perlman, H. (8 de junio de 2019). Surface Runoff and The Water Cycle. United States Geological Survey - Water Science School. Retrieved. <https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>
- Polat, N., Memduhoglu, A. y Kaya, Y. (2023). Evaluating the ground point classification performance of Agisoft Metashape Software. *Intercontinental Geoinformation Days*, 7, 187-190. <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/igd/article/view/1461>
- Pour, S.H., Wahab, A.K.A., Shahid, S., Asaduzzaman, Md., & Dewan, A. (2020). Low Impact Development Techniques to Mitigate the Impacts of Climate-Change-Induced Urban Floods: Current Trends, Issues and Challenges. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102373. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102373>
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards*, 108(1), 31–62. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-021-04715-8>
- Reyes-Cedeño, I. G., Hernández-Marín, M., Pacheco-Guerrero, A. I., & Gannon, J. P. (2023). Comprehensive Methodology and Analysis to Determine the Environmental Flow Regime in the Temporary Stream “La Yerbabuena” in Aguascalientes, Mexico. *Water*, 15(5), 879. <https://doi.org/10.3390/w15050879>
- Reyes-Cedeño, I. G., Hernández-Marín, M., Pacheco-Martínez, J., Rico-Martínez, R., Arzate-Cárdenas, M. A., Pacheco-Guerrero, A., Luna-Villavicencio, H., & Padilla-Ceniceros, R. (2024). Application of Vertical Electrical Sounding and Toxicity Tests for the Analysis of Vertical Hydraulic Connectivity through the Vadose Zone. *Water*, 16(2), 222. <https://doi.org/10.3390/w16020222>
- Reynolds, W.D. (1993). Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In Carter, M.R. (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis* (pp. 599-613). Canadian Society Soil Science. Lewis Publishers.
- Reynolds, W.D. (2008). Saturated Hydraulic Properties: Well Permeameter. In Carter, M.R. and Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis 2nd ed.* (pp. 1025-1042). Canadian Society of Soil Science. CRC Press.

- Reynolds, W.D., Galloway, K.A., & Radcliffe, D.E. (2015). The relationship between percolation time and field-saturated hydraulic conductivity for cylindrical test holes. *Proceedings of the Annual Conference of the National Onsite Wastewater Recycling Association*.
- Ritchie, H., Rosado, P., Roser, M. (27 de enero de 2025). *Natural disasters*. University of Oxford. <https://ourworldindata.org/natural-disasters>
- Rosenzweig, B. R., McPhillips, L., Chang, H., Cheng, C., Welty, C., Matsler, M., & Davidson, C. I. (2018). Pluvial flood risk and opportunities for resilience. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), e1302. <https://doi.org/10.1002/wat2.1302>
- Sandoval, G. F. B., Galobardes I., André Campos, A., & Toralles, B. M. (2020). Assessing the phenomenon of clogging of pervious concrete (Pc): Experimental test and model proposition, *Journal of Building Engineering*, 29, 101203. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101203>.
- Singh, A., Sarma, A. K., & Hack, J. (2020). Cost-effective optimization of nature-based solutions for reducing urban floods considering limited space availability. *Environmental processes*, 7, 297-319. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00420-8>
- Sirois, F., & Grilli, F. (2015). Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices. *Superconductor Science and Technology*, 28(4), 043002. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/28/4/043002>
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M. y Avant, B. (2017). An Overview of Rainfall-Runoff Model Types (Report EPA/600/R-14/152). *Environmental Protection Agency*. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=339328&Lab=NERL
- Streeter, V. & Wylie, E.B. (1975). *Fluid Mechanics 6th edition*. McGraw-Hill
- Subramanya, K. (2013). *Engineering hydrology 4th ed*. McGraw Hill
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F., Dutta, D., y Kim, S. J. E. M. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental modelling and software*, 90, 201-216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

- Tom, R. O., George, K. O., Joanes, A. O., & Haron, A. (2022). Review of flood modelling and models in developing cities and informal settlements: A case of Nairobi city. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 43, 101188. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101188>
- Umar, N., & Gray, A. (2023). Flooding in Nigeria: a review of its occurrence and impacts and approaches to modelling flood data. *International Journal of Environmental Studies*, 80(3), 540-561. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207233.2022.2081471>
- USDA United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds: Technical Release 55 second edition*. Natural Resources Conservation Services
- USGS United States Geological Survey. (6 de octubre de 2024). *Boundary conditions*. <https://water.usgs.gov/nrp>
- Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., & Summerell, G. (2012). Guidelines for Rainfall-Runoff Modelling: Towards best practice model application. *EWater Cooperative Research Centre*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Guidelines-for-rainfall-runoff-modelling>
- Vázquez-Tarrío, D., Ruiz-Villanueva, V., Garrote, J., Benito, G., Calle, M., Lucía, A., & Díez-Herrero, A. (2024). Effects of sediment transport on flood hazards: Lessons learned and remaining challenges. *Geomorphology*, 446, 108976. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108976>
- Vizcaíno-López, C. I., Hernández-Marín, M., Ochoa-González, G. H., Guerrero-Martínez, L., Reyes-Cedeño, I. G., Pacheco-Guerrero, A. I. (2025a). Experimental and numerical investigation on clogging by trapped solid particles in permeable porous concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, ae04810. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04810>
- Vizcaíno-López, C. I., Soto-Zamora, M. A., Hernández-Marín, M. (2025b). Modelos Digitales para el modelado numérico de inundaciones en zonas urbanas obtenidos con técnicas de fotogrametría y GIS. *Conciencia Tecnológica*, Vol. 68. <https://www.redalyc.org/revista.oa?id=944>
- Wohl, E. (2013). Streams. En Likens, G. N. (Ed.) *Encyclopedia of Inland Waters 2nd ed.* (pp. 756-765) Elsevier.

Wu, Y., Han, X., & Lin, P. (2024). Numerical simulation and characteristic analysis of flood intrusion into streets and buildings. *Journal of Hydrology*, 631, 130751. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130751>

Yang C. T. (1996). *Sediment Transport, Theory and Practice*. Mc Graw Hill



ANEXOS

Anexo 1. Análisis de frecuencias

Tabla A1. Ajuste de los valores de precipitación de las series anuales 1004 y 1097 aplicando la distribución Gamma incompleta, incluyendo las extrapolaciones para periodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Serie 1004					Serie 1097					
m	X (mm)	P(X ≤ x)	u	Xgi (mm)	m	X (mm)	P(X ≤ x)	Kn	Kgi	Xgi (mm)
		0.999	5.4107	132.52			0.999	3.0902	3.6971	91.46
		0.998	5.3830	131.84			0.998	2.8782	3.3908	88.17
		0.995	5.3000	129.80			0.995	2.5758	2.9669	83.61
		0.990	5.1616	126.41			0.990	2.3263	2.6282	79.97
1	161.30	0.980	4.8848	119.64			0.980	2.0537	2.2697	76.12
2	112.50	0.960	4.3313	106.08	1	70.00	0.958	1.6449	1.7538	70.57
3	102.00	0.940	3.9511	96.77	2	67.00	0.917	1.3408	1.3868	66.63
4	87.30	0.920	3.7443	91.70	3	65.00	0.875	1.1264	1.1364	63.94
5	85.50	0.900	3.5374	86.64	4	61.50	0.833	0.9542	0.9403	61.83
6	84.00	0.880	3.4234	83.84	5	59.70	0.792	0.8064	0.7754	60.06
7	74.60	0.860	3.3094	81.05	6	59.00	0.750	0.6745	0.6310	58.51
8	71.20	0.840	3.1954	78.26	7	59.00	0.708	0.5244	0.4696	56.77
9	66.00	0.820	3.0814	75.47	8	57.00	0.667	0.4125	0.3515	55.50
10	65.40	0.800	2.9674	72.68	9	56.00	0.625	0.3055	0.2401	54.30
11	65.00	0.780	2.9061	71.17	10	53.00	0.583	0.2090	0.1411	53.24
12	63.00	0.760	2.8447	69.67	11	51.00	0.542	0.1004	0.0312	52.06
13	60.70	0.740	2.7834	68.17	12	51.00	0.500	0.0000	-0.0689	50.98
14	59.30	0.720	2.7221	66.67	13	51.00	0.458	-0.1257	-0.1923	49.66
15	58.40	0.700	2.6607	65.17	14	50.50	0.417	-0.2275	-0.2907	48.60
16	53.80	0.680	2.5994	63.66	15	49.50	0.375	-0.3319	-0.3901	47.53
17	53.00	0.660	2.5381	62.16	16	48.30	0.333	-0.4399	-0.4914	46.44
18	52.70	0.640	2.4767	60.66	17	47.50	0.292	-0.5534	-0.5962	45.32
19	51.80	0.620	2.4154	59.16	18	46.50	0.250	-0.6745	-0.7061	44.14
20	50.50	0.600	2.3541	57.65	19	45.65	0.208	-0.8416	-0.8546	42.54
21	50.30	0.580	2.2927	56.15	20	43.00	0.167	-0.9945	-0.9873	41.11
22	49.40	0.560	2.2314	54.65	21	41.00	0.125	-1.1750	-1.1401	39.47
23	48.60	0.540	2.1701	53.15	22	37.00	0.083	-1.4051	-1.3289	37.44
24	47.80	0.520	2.1087	51.65	23	20.50	0.042	-1.7507	-1.6002	34.53
25	47.30	0.500	2.0474	50.14						
26	47.00	0.480	2.0008	49.00						
27	47.00	0.460	1.9541	47.86						
28	45.40	0.440	1.9075	46.72						
29	43.00	0.420	1.8608	45.57						
30	43.00	0.400	1.8142	44.43						
31	43.00	0.380	1.7675	43.29						

32	42.80	0.360	1.7209	42.15							
33	42.50	0.340	1.6743	41.00							
34	42.30	0.320	1.6276	39.86							
35	42.00	0.300	1.5810	38.72							
36	41.70	0.280	1.5280	37.42							
37	40.50	0.260	1.4750	36.12							
38	40.40	0.240	1.4220	34.83							
39	38.50	0.220	1.3690	33.53							
40	36.00	0.200	1.3160	32.23							
41	36.00	0.180	1.2630	30.93							
42	35.00	0.160	1.2100	29.63							
43	34.80	0.140	1.1570	28.34							
44	34.30	0.120	1.1040	27.04							
45	33.20	0.100	1.0510	25.74							
46	29.00	0.080	0.9378	22.97							
47	28.20	0.060	0.8246	20.20							
48	24.40	0.040	0.7114	17.42							
49	24.00	0.020	0.5982	14.65							

Tabla A2. Ajuste de los valores de precipitación de las series anuales 1004 y 1097 aplicando la distribución Log-Pearson III, incluyendo las extrapolaciones para periodos de retorno de 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Serie 1004							Serie 1097						
M	X (mm)	P(X ≤ x)	Kn	K _{LP}	Log x	X _{LP} (mm)	m	X (mm)	P(X ≤ x)	Kn	K _{LP}	Log x	X _{LP} (mm)
		0.999	3.0902	4.1366	2.3791	239.38			0.999	3.0902	0.9623	1.8076	64.20
		0.998	2.8780	3.7566	2.3164	207.22			0.998	2.8782	0.9564	1.8069	64.11
		0.995	2.5758	3.2396	2.2312	170.29			0.995	2.5758	0.9545	1.8067	64.08
		0.990	2.3263	2.8338	2.1643	145.98			0.990	2.3263	0.9542	1.8067	64.07
1	161.30	0.980	2.0537	2.4115	2.0947	124.36			0.980	2.0537	0.9505	1.8063	64.01
2	112.50	0.960	1.7507	1.9675	2.0215	105.06	1	70.00	0.958	1.6449	0.9278	1.8038	63.65
3	102.00	0.940	1.5548	1.6942	1.9764	94.71	2	67.00	0.917	1.3408	0.8888	1.7995	63.03
4	87.30	0.920	1.4051	1.4925	1.9431	87.73	3	65.00	0.875	1.1264	0.8458	1.7948	62.35
5	85.50	0.900	1.2816	1.3307	1.9165	82.50	4	61.50	0.833	0.9542	0.8001	1.7898	61.64
6	84.00	0.880	1.1750	1.1943	1.8940	78.34	5	59.70	0.792	0.8064	0.7520	1.7846	60.89
7	74.60	0.860	1.0803	1.0757	1.8744	74.89	6	59.00	0.750	0.6745	0.7013	1.7790	60.12
8	71.20	0.840	0.9945	0.9703	1.8570	71.95	7	59.00	0.708	0.5244	0.6342	1.7717	59.11
9	66.00	0.820	0.9154	0.8748	1.8413	69.39	8	57.00	0.667	0.4125	0.5771	1.7654	58.27
10	65.40	0.800	0.8416	0.7871	1.8268	67.12	9	56.00	0.625	0.3055	0.5164	1.7588	57.39
11	65.00	0.780	0.7722	0.7060	1.8135	65.08	10	53.00	0.583	0.2090	0.4565	1.7522	56.53
12	63.00	0.760	0.7063	0.6301	1.8009	63.23	11	51.00	0.542	0.1004	0.3827	1.7442	55.49
13	60.70	0.740	0.6433	0.5585	1.7891	61.54	12	51.00	0.500	0.0000	0.3084	1.7360	54.46
14	59.30	0.720	0.5828	0.4907	1.7780	59.98	13	51.00	0.458	-0.1257	0.2065	1.7249	53.08
15	58.40	0.700	0.5244	0.4262	1.7673	58.52	14	50.50	0.417	-0.2275	0.1166	1.7151	51.89
16	53.80	0.680	0.4677	0.3643	1.7571	57.16	15	49.50	0.375	-0.3319	0.0172	1.7042	50.61

17	53.00	0.660	0.4125	0.3048	1.7473	55.89		16	48.30	0.333	-0.4399	-0.0936	1.6921	49.21
18	52.70	0.640	0.3585	0.2474	1.7378	54.68		17	47.50	0.292	-0.5534	-0.2191	1.6784	47.68
19	51.80	0.620	0.3055	0.1917	1.7287	53.54		18	46.50	0.250	-0.6745	-0.3636	1.6626	45.98
20	50.50	0.600	0.2533	0.1375	1.7197	52.45		19	45.65	0.208	-0.8416	-0.5819	1.6387	43.52
21	50.30	0.580	0.2090	0.0920	1.7122	51.55		20	43.00	0.167	-0.9945	-0.8016	1.6146	41.18
22	49.40	0.560	0.1510	0.0331	1.7025	50.41		21	41.00	0.125	-1.1750	-1.0868	1.5835	38.32
23	48.60	0.540	0.1004	-0.0176	1.6942	49.45		22	37.00	0.083	-1.4051	-1.4931	1.5390	34.60
24	47.80	0.520	0.0502	-0.0673	1.6860	48.53		23	20.50	0.042	-1.7507	-2.1993	1.4618	28.96
25	47.30	0.500	0.0000	-0.1164	1.6779	47.63								
26	47.00	0.480	-0.0502	-0.1649	1.6699	46.76								
27	47.00	0.460	-0.1004	-0.2128	1.6620	45.92								
28	45.40	0.440	-0.1510	-0.2606	1.6541	45.09								
29	43.00	0.420	-0.2090	-0.3146	1.6452	44.18								
30	43.00	0.400	-0.2533	-0.3553	1.6385	43.50								
31	43.00	0.380	-0.3055	-0.4027	1.6307	42.72								
32	42.80	0.360	-0.3585	-0.4502	1.6228	41.96								
33	42.50	0.340	-0.4125	-0.4980	1.6150	41.21								
34	42.30	0.320	-0.4677	-0.5462	1.6070	40.46								
35	42.00	0.300	-0.5244	-0.5949	1.5990	39.72								
36	41.70	0.280	-0.5828	-0.6445	1.5908	38.98								
37	40.50	0.260	-0.6433	-0.6950	1.5825	38.24								
38	40.40	0.240	-0.7063	-0.7467	1.5739	37.49								
39	38.50	0.220	-0.7722	-0.8000	1.5652	36.74								
40	36.00	0.200	-0.8416	-0.8550	1.5561	35.98								
41	36.00	0.180	-0.9154	-0.9125	1.5466	35.21								
42	35.00	0.160	-0.9945	-0.9728	1.5367	34.41								
43	34.80	0.140	-1.0803	-1.0368	1.5261	33.58								
44	34.30	0.120	-1.1750	-1.1057	1.5148	32.72								
45	33.20	0.100	-1.2816	-1.1812	1.5023	31.79								
46	29.00	0.080	-1.4051	-1.2657	1.4884	30.79								
47	28.20	0.060	-1.5548	-1.3643	1.4721	29.66								
48	24.40	0.040	-1.7507	-1.4869	1.4519	28.31								
49	24.00	0.020	-2.0537	-1.6627	1.4229	26.48								

Tabla A3. Ajuste de los valores de precipitación de las series anuales 1004 y 1097 aplicando la distribución Gumbel.

Serie 1004							Serie 1097						
m	X (mm)	P(X ≤ x)	Tr (años)	y _T	K _G	X _G (mm)	m	X (mm)	P(X ≤ x)	Tr (años)	y _T	K _G	X _G (mm)
		0.999	1000.00	6.9073	5.4868	188.16			0.999	1000.00	6.9073	5.9004	115.14
		0.998	500.00	6.2136	4.8883	173.50			0.998	500.00	6.2136	5.2588	108.24
		0.995	200.00	5.2958	4.0964	154.11			0.995	200.00	5.2958	4.4099	99.12
		0.990	100.00	4.6001	3.4962	139.41			0.990	100.00	4.6001	3.7664	92.20
1	161.3	0.980	50.00	3.9019	2.8937	124.65			0.980	50.00	3.9019	3.1206	85.26
2	112.5	0.960	25.00	3.1985	2.2868	109.79	1	70.00	0.958	24.00	3.1568	2.4314	77.85

Tabla A4. Resumen comparativo de valores históricos y ajustados de las series y cálculo del error estándar de ajuste.

m	P(X ≤ x)	Tr (años)	Históricos X(mm)	Gamma X _{gi} (mm)	L-Pearson X _{LP} (mm)	Gumbel X _G (mm)	m	P(X ≤ x)	Tr (años)	Históricos X(mm)	Gamma X _{gi} (mm)	L-Pearson X _{LP} (mm)	Gumbel X _G (mm)
1	0.980	50.000	161.30	119.64	124.36	124.65	1	0.958	24.000	70.00	70.57	63.65	77.85
2	0.960	25.000	112.50	106.08	105.06	109.79	2	0.917	12.000	67.00	66.63	63.03	70.75
3	0.940	16.667	102.00	96.77	94.71	101.00	3	0.875	8.000	65.00	63.94	62.35	66.49
4	0.920	12.500	87.30	91.70	87.73	94.70	4	0.833	6.000	61.50	61.83	61.64	63.39
5	0.900	10.000	85.50	86.64	82.50	89.75	5	0.792	4.800	59.70	60.06	60.89	60.93
6	0.880	8.333	84.00	83.84	78.34	85.67	6	0.750	4.000	59.00	58.51	60.12	58.86
7	0.860	7.143	74.60	81.05	74.89	82.17	7	0.708	3.429	59.00	56.77	59.11	57.06
8	0.840	6.250	71.20	78.26	71.95	79.11	8	0.667	3.000	57.00	55.50	58.27	55.45
9	0.820	5.556	66.00	75.47	69.39	76.38	9	0.625	2.667	56.00	54.30	57.39	53.98
10	0.800	5.000	65.40	72.68	67.12	73.90	10	0.583	2.400	53.00	53.24	56.53	52.62
11	0.780	4.545	65.00	71.17	65.08	71.63	11	0.542	2.182	51.00	52.06	55.49	51.34
12	0.760	4.167	63.00	69.67	63.23	69.53	12	0.500	2.000	51.00	50.98	54.46	50.12
13	0.740	3.846	60.70	68.17	61.54	67.57	13	0.458	1.846	51.00	49.66	53.08	48.94
14	0.720	3.571	59.30	66.67	59.98	65.73	14	0.417	1.714	50.50	48.60	51.89	47.79
15	0.700	3.333	58.40	65.17	58.52	63.99	15	0.375	1.600	49.50	47.53	50.61	46.66
16	0.680	3.125	53.80	63.66	57.16	62.34	16	0.333	1.500	48.30	46.44	49.21	45.54
17	0.660	2.941	53.00	62.16	55.89	60.76	17	0.292	1.412	47.50	45.32	47.68	44.40
18	0.640	2.778	52.70	60.66	54.68	59.25	18	0.250	1.333	46.50	44.14	45.98	43.23
19	0.620	2.632	51.80	59.16	53.54	57.80	19	0.208	1.263	45.65	42.54	43.52	42.00
20	0.600	2.500	50.50	57.65	52.45	56.40	20	0.167	1.200	43.00	41.11	41.18	40.67
21	0.580	2.381	50.30	56.15	51.55	55.04	21	0.125	1.143	41.00	39.47	38.32	39.19
22	0.560	2.273	49.40	54.65	50.41	53.72	22	0.083	1.091	37.00	37.44	34.60	37.42
23	0.540	2.174	48.60	53.15	49.45	52.43	23	0.042	1.043	20.50	34.53	28.96	34.98
24	0.520	2.083	47.80	51.65	48.53	51.18				Error	3.44	3.20	4.22
25	0.500	2.000	47.30	50.14	47.63	49.95							
26	0.480	1.923	47.00	49.00	46.76	48.74							
27	0.460	1.852	47.00	47.86	45.92	47.55							
28	0.440	1.786	45.40	46.72	45.09	46.37							
29	0.420	1.724	43.00	45.57	44.18	45.21							
30	0.400	1.667	43.00	44.43	43.50	44.05							
31	0.380	1.613	43.00	43.29	42.72	42.90							
32	0.360	1.563	42.80	42.15	41.96	41.75							
33	0.340	1.515	42.50	41.00	41.21	40.60							
34	0.320	1.471	42.30	39.86	40.46	39.44							
35	0.300	1.429	42.00	38.72	39.72	38.28							
36	0.280	1.389	41.70	37.42	38.98	37.10							
37	0.260	1.351	40.50	36.12	38.24	35.91							
38	0.240	1.316	40.40	34.83	37.49	34.69							

39	0.220	1.282	38.50	33.53	36.74	33.44								
40	0.200	1.250	36.00	32.23	35.98	32.15								
41	0.180	1.220	36.00	30.93	35.21	30.81								
42	0.160	1.190	35.00	29.63	34.41	29.40								
43	0.140	1.163	34.80	28.34	33.58	27.92								
44	0.120	1.136	34.30	27.04	32.72	26.32								
45	0.100	1.111	33.20	25.74	31.79	24.58								
46	0.080	1.087	29.00	22.97	30.79	22.62								
47	0.060	1.064	28.20	20.20	29.66	20.34								
48	0.040	1.042	24.40	17.42	28.31	17.50								
49	0.020	1.020	24.00	14.65	26.48	13.38								
			Error	8.43	5.90	7.87								



Anexo 2. Hietogramas de precipitación

Tabla A5. Valores de los Hietogramas con periodos de retorno de 5 y 10 años.

Hietograma 1 (Tr=5 años)						Hietograma 2 (Tr=10 años)					
No.	Tiempo (min)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Precipitación (mm)	Incremento de Precipitación (mm)	Precipitación en hietograma (mm)	No.	Tiempo (min)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Precipitación (mm)	Incremento de Precipitación (mm)	Precipitación en hietograma (mm)
1	10	116.91	19.48	19.48	0.21	1	10	142.91	23.82	23.82	0.25
2	20	83.90	27.97	8.48	0.21	2	20	102.55	34.18	10.37	0.26
3	30	66.32	33.16	5.19	0.22	3	30	81.06	40.53	6.35	0.27
4	40	55.27	36.84	3.69	0.22	4	40	67.56	45.04	4.51	0.27
5	50	47.62	39.68	2.84	0.23	5	50	58.21	48.51	3.47	0.28
6	60	41.99	41.99	2.31	0.24	6	60	51.33	51.33	2.82	0.29
7	70	37.66	43.93	1.94	0.24	7	70	46.03	53.70	2.37	0.30
8	80	34.21	45.61	1.68	0.25	8	80	41.81	55.75	2.05	0.31
9	90	31.39	47.08	1.47	0.26	9	90	38.37	57.55	1.80	0.32
10	100	29.04	48.40	1.32	0.27	10	100	35.50	59.16	1.61	0.33
11	110	27.05	49.59	1.19	0.28	11	110	33.07	60.62	1.46	0.34
12	120	25.34	50.68	1.09	0.29	12	120	30.98	61.95	1.33	0.35
13	130	23.85	51.68	1.00	0.30	13	130	29.16	63.18	1.23	0.36
14	140	22.55	52.61	0.93	0.31	14	140	27.56	64.32	1.14	0.38
15	150	21.39	53.48	0.87	0.32	15	150	26.15	65.38	1.06	0.39
16	160	20.36	54.30	0.81	0.34	16	160	24.89	66.37	0.99	0.41
17	170	19.43	55.06	0.77	0.35	17	170	23.76	67.31	0.94	0.43
18	180	18.60	55.79	0.72	0.37	18	180	22.73	68.19	0.89	0.45
19	190	17.83	56.47	0.69	0.39	19	190	21.80	69.03	0.84	0.47
20	200	17.14	57.13	0.65	0.41	20	200	20.95	69.83	0.80	0.50
21	210	16.50	57.75	0.62	0.43	21	210	20.17	70.60	0.76	0.53
22	220	15.91	58.35	0.60	0.46	22	220	19.45	71.33	0.73	0.56
23	230	15.37	58.92	0.57	0.49	23	230	18.79	72.02	0.70	0.60
24	240	14.87	59.47	0.55	0.53	24	240	18.17	72.70	0.67	0.65
25	250	14.40	60.00	0.53	0.57	25	250	17.60	73.34	0.65	0.70
26	260	13.96	60.51	0.51	0.62	26	260	17.07	73.96	0.62	0.76
27	270	13.56	61.00	0.49	0.69	27	270	16.57	74.56	0.60	0.84
28	280	13.17	61.47	0.48	0.77	28	280	16.10	75.14	0.58	0.94
29	290	12.81	61.93	0.46	0.87	29	290	15.66	75.71	0.56	1.06
30	300	12.48	62.38	0.45	1.00	30	300	15.25	76.25	0.54	1.23
31	310	12.16	62.81	0.43	1.19	31	310	14.86	76.78	0.53	1.46
32	320	11.86	63.23	0.42	1.47	32	320	14.49	77.29	0.51	1.80
33	330	11.57	63.64	0.41	1.94	33	330	14.14	77.79	0.50	2.37
34	340	11.30	64.04	0.40	2.84	34	340	13.81	78.28	0.49	3.47
35	350	11.04	64.42	0.39	5.19	35	350	13.50	78.75	0.47	6.35
36	360	10.80	64.80	0.38	19.48	36	360	13.20	79.21	0.46	23.82
37	370	10.57	65.17	0.37	8.48	37	370	12.92	79.66	0.45	10.37

38	380	10.35	65.53	0.36	3.69		38	380	12.65	80.10	0.44	4.51
39	390	10.13	65.88	0.35	2.31		39	390	12.39	80.53	0.43	2.82
40	400	9.93	66.22	0.34	1.68		40	400	12.14	80.95	0.42	2.05
41	410	9.74	66.55	0.34	1.32		41	410	11.91	81.36	0.41	1.61
42	420	9.55	66.88	0.33	1.09		42	420	11.68	81.76	0.40	1.33
43	430	9.38	67.20	0.32	0.93		43	430	11.46	82.15	0.39	1.14
44	440	9.21	67.52	0.31	0.81		44	440	11.25	82.53	0.38	0.99
45	450	9.04	67.83	0.31	0.72		45	450	11.05	82.91	0.38	0.89
46	460	8.89	68.13	0.30	0.65		46	460	10.86	83.28	0.37	0.80
47	470	8.74	68.43	0.30	0.60		47	470	10.68	83.64	0.36	0.73
48	480	8.59	68.72	0.29	0.55		48	480	10.50	84.00	0.36	0.67
49	490	8.45	69.00	0.29	0.51		49	490	10.33	84.35	0.35	0.62
50	500	8.31	69.28	0.28	0.48		50	500	10.16	84.69	0.34	0.58
51	510	8.18	69.56	0.28	0.45		51	510	10.00	85.03	0.34	0.54
52	520	8.06	69.83	0.27	0.42		52	520	9.85	85.36	0.33	0.51
53	530	7.94	70.10	0.27	0.40		53	530	9.70	85.69	0.33	0.49
54	540	7.82	70.36	0.26	0.38		54	540	9.56	86.01	0.32	0.46
55	550	7.70	70.62	0.26	0.36		55	550	9.42	86.32	0.32	0.44
56	560	7.59	70.87	0.25	0.34		56	560	9.28	86.63	0.31	0.42
57	570	7.49	71.12	0.25	0.33		57	570	9.15	86.94	0.31	0.40
58	580	7.38	71.37	0.25	0.31		58	580	9.02	87.24	0.30	0.38
59	590	7.28	71.61	0.24	0.30		59	590	8.90	87.54	0.30	0.37
60	600	7.18	71.85	0.24	0.29		60	600	8.78	87.83	0.29	0.36
61	610	7.09	72.09	0.24	0.28		61	610	8.67	88.12	0.29	0.34
62	620	7.00	72.32	0.23	0.27		62	620	8.55	88.40	0.28	0.33
63	630	6.91	72.55	0.23	0.26		63	630	8.45	88.68	0.28	0.32
64	640	6.82	72.77	0.23	0.25		64	640	8.34	88.96	0.28	0.31
65	650	6.74	73.00	0.22	0.25		65	650	8.24	89.23	0.27	0.30
66	660	6.66	73.22	0.22	0.24		66	660	8.14	89.50	0.27	0.29
67	670	6.58	73.43	0.22	0.23		67	670	8.04	89.76	0.27	0.28
68	680	6.50	73.65	0.21	0.23		68	680	7.94	90.03	0.26	0.28
69	690	6.42	73.86	0.21	0.22		69	690	7.85	90.29	0.26	0.27
70	700	6.35	74.07	0.21	0.21		70	700	7.76	90.54	0.26	0.26
71	710	6.28	74.27	0.21	0.21		71	710	7.67	90.79	0.25	0.26
72	720	6.21	74.48	0.20	0.20		72	720	7.59	91.04	0.25	0.25

Tabla A6. Valores de los Hietogramas con periodos de retorno de 25 y 50 años.

Hietograma 3 (Tr=25 años)						Hietograma 4 (Tr=50 años)					
No.	Tiempo (min)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Precipitación (mm)	Incremento de Precipitación (mm)	Precipitación en hietograma (mm)	No.	Tiempo (min)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Precipitación (mm)	Incremento de Precipitación (mm)	Precipitación en hietograma (mm)
1	10	177.28	29.55	29.55	0.31	1	10	203.28	33.88	33.88	0.36
2	20	127.22	42.41	12.86	0.32	2	20	145.88	48.63	14.75	0.37
3	30	100.56	50.28	7.87	0.33	3	30	115.31	57.66	9.03	0.38

4	40	83.81	55.87	5.59	0.34		4	40	96.10	64.07	6.41	0.39
5	50	72.21	60.18	4.31	0.35		5	50	82.81	69.00	4.94	0.40
6	60	63.68	63.68	3.50	0.36		6	60	73.02	73.02	4.01	0.41
7	70	57.10	66.62	2.94	0.37		7	70	65.48	76.39	3.37	0.42
8	80	51.87	69.16	2.54	0.38		8	80	59.48	79.30	2.91	0.43
9	90	47.60	71.40	2.24	0.39		9	90	54.58	81.87	2.56	0.45
10	100	44.04	73.39	2.00	0.40		10	100	50.50	84.16	2.29	0.46
11	110	41.02	75.20	1.81	0.42		11	110	47.04	86.23	2.07	0.48
12	120	38.43	76.85	1.65	0.43		12	120	44.06	88.13	1.89	0.50
13	130	36.17	78.38	1.52	0.45		13	130	41.48	89.87	1.74	0.52
14	140	34.19	79.79	1.41	0.47		14	140	39.21	91.49	1.62	0.54
15	150	32.44	81.10	1.32	0.49		15	150	37.20	93.00	1.51	0.56
16	160	30.88	82.34	1.23	0.51		16	160	35.40	94.41	1.41	0.58
17	170	29.47	83.50	1.16	0.53		17	170	33.79	95.74	1.33	0.61
18	180	28.20	84.60	1.10	0.56		18	180	32.33	97.00	1.26	0.64
19	190	27.04	85.64	1.04	0.59		19	190	31.01	98.20	1.19	0.67
20	200	25.99	86.63	0.99	0.62		20	200	29.80	99.34	1.14	0.71
21	210	25.02	87.58	0.95	0.66		21	210	28.69	100.42	1.08	0.75
22	220	24.13	88.48	0.90	0.70		22	220	27.67	101.46	1.04	0.80
23	230	23.31	89.35	0.87	0.75		23	230	26.73	102.45	0.99	0.85
24	240	22.54	90.18	0.83	0.80		24	240	25.85	103.41	0.95	0.92
25	250	21.84	90.98	0.80	0.87		25	250	25.04	104.32	0.92	0.99
26	260	21.17	91.75	0.77	0.95		26	260	24.28	105.21	0.89	1.08
27	270	20.56	92.50	0.75	1.04		27	270	23.57	106.06	0.85	1.19
28	280	19.98	93.22	0.72	1.16		28	280	22.91	106.89	0.83	1.33
29	290	19.43	93.92	0.70	1.32		29	290	22.28	107.69	0.80	1.51
30	300	18.92	94.59	0.68	1.52		30	300	21.69	108.46	0.77	1.74
31	310	18.43	95.25	0.66	1.81		31	310	21.14	109.22	0.75	2.07
32	320	17.98	95.88	0.64	2.24		32	320	20.61	109.95	0.73	2.56
33	330	17.55	96.50	0.62	2.94		33	330	20.12	110.66	0.71	3.37
34	340	17.14	97.10	0.60	4.31		34	340	19.65	111.35	0.69	4.94
35	350	16.75	97.69	0.59	7.87		35	350	19.20	112.02	0.67	9.03
36	360	16.38	98.26	0.57	29.55		36	360	18.78	112.67	0.66	33.88
37	370	16.02	98.82	0.56	12.86		37	370	18.38	113.31	0.64	14.75
38	380	15.69	99.36	0.54	5.59		38	380	17.99	113.94	0.62	6.41
39	390	15.37	99.90	0.53	3.50		39	390	17.62	114.55	0.61	4.01
40	400	15.06	100.42	0.52	2.54		40	400	17.27	115.14	0.60	2.91
41	410	14.77	100.92	0.51	2.00		41	410	16.94	115.73	0.58	2.29
42	420	14.49	101.42	0.50	1.65		42	420	16.61	116.30	0.57	1.89
43	430	14.22	101.91	0.49	1.41		43	430	16.31	116.86	0.56	1.62
44	440	13.96	102.39	0.48	1.23		44	440	16.01	117.40	0.55	1.41
45	450	13.71	102.85	0.47	1.10		45	450	15.73	117.94	0.54	1.26
46	460	13.48	103.31	0.46	0.99		46	460	15.45	118.46	0.53	1.14
47	470	13.25	103.76	0.45	0.90		47	470	15.19	118.98	0.52	1.04
48	480	13.03	104.20	0.44	0.83		48	480	14.94	119.49	0.51	0.95
49	490	12.81	104.64	0.43	0.77		49	490	14.69	119.98	0.50	0.89
50	500	12.61	105.06	0.43	0.72		50	500	14.46	120.47	0.49	0.83

51	510	12.41	105.48	0.42	0.68		51	510	14.23	120.95	0.48	0.77
52	520	12.22	105.89	0.41	0.64		52	520	14.01	121.42	0.47	0.73
53	530	12.03	106.30	0.40	0.60		53	530	13.80	121.89	0.46	0.69
54	540	11.85	106.69	0.40	0.57		54	540	13.59	122.34	0.46	0.66
55	550	11.68	107.08	0.39	0.54		55	550	13.40	122.79	0.45	0.62
56	560	11.51	107.47	0.39	0.52		56	560	13.20	123.23	0.44	0.60
57	570	11.35	107.85	0.38	0.50		57	570	13.02	123.67	0.43	0.57
58	580	11.20	108.22	0.37	0.48		58	580	12.84	124.10	0.43	0.55
59	590	11.04	108.59	0.37	0.46		59	590	12.66	124.52	0.42	0.53
60	600	10.90	108.95	0.36	0.44		60	600	12.49	124.93	0.42	0.51
61	610	10.75	109.31	0.36	0.43		61	610	12.33	125.34	0.41	0.49
62	620	10.61	109.66	0.35	0.41		62	620	12.17	125.75	0.40	0.47
63	630	10.48	110.01	0.35	0.40		63	630	12.01	126.15	0.40	0.46
64	640	10.35	110.35	0.34	0.39		64	640	11.86	126.54	0.39	0.44
65	650	10.22	110.69	0.34	0.37		65	650	11.72	126.93	0.39	0.43
66	660	10.09	111.03	0.33	0.36		66	660	11.57	127.31	0.38	0.42
67	670	9.97	111.35	0.33	0.35		67	670	11.43	127.69	0.38	0.40
68	680	9.85	111.68	0.33	0.34		68	680	11.30	128.06	0.37	0.39
69	690	9.74	112.00	0.32	0.33		69	690	11.17	128.43	0.37	0.38
70	700	9.63	112.32	0.32	0.33		70	700	11.04	128.79	0.36	0.37
71	710	9.52	112.63	0.31	0.32		71	710	10.91	129.15	0.36	0.36
72	720	9.41	112.94	0.31	0.31		72	720	10.79	129.50	0.35	0.35

Tabla A7. Valores de los Hietogramas con periodos de retorno de 100 y 200 años.

Hietograma 5 (Tr=100 años)						Hietograma 6 (Tr=200 años)					
No.	Tiempo (min)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Precipitación (mm)	Incremento de Precipitación (mm)	Precipitación en hietograma (mm)	No.	Tiempo (min)	Intensidad de precipitación (mm/h)	Precipitación (mm)	Incremento de Precipitación (mm)	Precipitación en hietograma (mm)
1	10	229.28	38.21	38.21	0.41	1	10	255.28	42.55	42.55	0.45
2	20	164.54	54.85	16.63	0.42	2	20	183.20	61.07	18.52	0.46
3	30	130.06	65.03	10.18	0.43	3	30	144.81	72.40	11.34	0.47
4	40	108.39	72.26	7.23	0.44	4	40	120.68	80.45	8.05	0.49
5	50	93.40	77.83	5.57	0.45	5	50	103.99	86.66	6.20	0.50
6	60	82.35	82.35	4.52	0.46	6	60	91.69	91.69	5.04	0.51
7	70	73.85	86.16	3.81	0.48	7	70	82.23	95.93	4.24	0.53
8	80	67.08	89.45	3.29	0.49	8	80	74.69	99.59	3.66	0.55
9	90	61.56	92.34	2.89	0.51	9	90	68.54	102.81	3.22	0.56
10	100	56.95	94.92	2.58	0.52	10	100	63.41	105.69	2.88	0.58
11	110	53.05	97.26	2.34	0.54	11	110	59.07	108.29	2.60	0.60
12	120	49.70	99.40	2.14	0.56	12	120	55.33	110.67	2.38	0.62
13	130	46.78	101.36	1.97	0.58	13	130	52.09	112.86	2.19	0.65
14	140	44.22	103.19	1.82	0.60	14	140	49.24	114.89	2.03	0.67
15	150	41.96	104.89	1.70	0.63	15	150	46.71	116.79	1.90	0.70
16	160	39.93	106.49	1.60	0.66	16	160	44.46	118.56	1.78	0.73

17	170	38.11	107.99	1.50	0.69		17	170	42.44	120.24	1.67	0.77
18	180	36.47	109.41	1.42	0.72		18	180	40.61	121.82	1.58	0.80
19	190	34.98	110.76	1.35	0.76		19	190	38.94	123.32	1.50	0.84
20	200	33.61	112.04	1.28	0.80		20	200	37.42	124.75	1.43	0.89
21	210	32.36	113.26	1.22	0.85		21	210	36.03	126.11	1.36	0.94
22	220	31.21	114.43	1.17	0.90		22	220	34.75	127.41	1.30	1.00
23	230	30.14	115.56	1.12	0.96		23	230	33.56	128.66	1.25	1.07
24	240	29.16	116.63	1.08	1.04		24	240	32.46	129.86	1.20	1.15
25	250	28.24	117.67	1.04	1.12		25	250	31.44	131.01	1.15	1.25
26	260	27.38	118.67	1.00	1.22		26	260	30.49	132.12	1.11	1.36
27	270	26.58	119.63	0.96	1.35		27	270	29.60	133.20	1.07	1.50
28	280	25.83	120.56	0.93	1.50		28	280	28.76	134.23	1.04	1.67
29	290	25.13	121.46	0.90	1.70		29	290	27.98	135.24	1.00	1.90
30	300	24.47	122.34	0.87	1.97		30	300	27.24	136.21	0.97	2.19
31	310	23.84	123.19	0.85	2.34		31	310	26.55	137.16	0.94	2.60
32	320	23.25	124.01	0.82	2.89		32	320	25.89	138.07	0.92	3.22
33	330	22.69	124.81	0.80	3.81		33	330	25.27	138.96	0.89	4.24
34	340	22.16	125.59	0.78	5.57		34	340	24.68	139.83	0.87	6.20
35	350	21.66	126.35	0.76	10.18		35	350	24.12	140.68	0.84	11.34
36	360	21.18	127.09	0.74	38.21		36	360	23.58	141.50	0.82	42.55
37	370	20.73	127.81	0.72	16.63		37	370	23.08	142.30	0.80	18.52
38	380	20.29	128.51	0.70	7.23		38	380	22.59	143.09	0.78	8.05
39	390	19.88	129.20	0.69	4.52		39	390	22.13	143.85	0.77	5.04
40	400	19.48	129.87	0.67	3.29		40	400	21.69	144.60	0.75	3.66
41	410	19.10	130.53	0.66	2.58		41	410	21.27	145.33	0.73	2.88
42	420	18.74	131.17	0.64	2.14		42	420	20.86	146.05	0.72	2.38
43	430	18.39	131.80	0.63	1.82		43	430	20.48	146.75	0.70	2.03
44	440	18.06	132.42	0.62	1.60		44	440	20.10	147.44	0.69	1.78
45	450	17.74	133.02	0.60	1.42		45	450	19.75	148.11	0.67	1.58
46	460	17.43	133.62	0.59	1.28		46	460	19.40	148.77	0.66	1.43
47	470	17.13	134.20	0.58	1.17		47	470	19.07	149.42	0.65	1.30
48	480	16.85	134.77	0.57	1.08		48	480	18.76	150.05	0.64	1.20
49	490	16.57	135.33	0.56	1.00		49	490	18.45	150.68	0.62	1.11
50	500	16.31	135.88	0.55	0.93		50	500	18.15	151.29	0.61	1.04
51	510	16.05	136.42	0.54	0.87		51	510	17.87	151.89	0.60	0.97
52	520	15.80	136.95	0.53	0.82		52	520	17.59	152.48	0.59	0.92
53	530	15.56	137.48	0.52	0.78		53	530	17.33	153.07	0.58	0.87
54	540	15.33	137.99	0.51	0.74		54	540	17.07	153.64	0.57	0.82
55	550	15.11	138.50	0.51	0.70		55	550	16.82	154.20	0.56	0.78
56	560	14.89	138.99	0.50	0.67		56	560	16.58	154.76	0.55	0.75
57	570	14.68	139.49	0.49	0.64		57	570	16.35	155.30	0.55	0.72
58	580	14.48	139.97	0.48	0.62		58	580	16.12	155.84	0.54	0.69
59	590	14.28	140.44	0.48	0.59		59	590	15.90	156.37	0.53	0.66
60	600	14.09	140.91	0.47	0.57		60	600	15.69	156.89	0.52	0.64
61	610	13.91	141.38	0.46	0.55		61	610	15.48	157.41	0.51	0.61
62	620	13.73	141.83	0.46	0.53		62	620	15.28	157.92	0.51	0.59
63	630	13.55	142.28	0.45	0.51		63	630	15.09	158.42	0.50	0.57

64	640	13.38	142.72	0.44	0.50		64	640	14.90	158.91	0.49	0.55
65	650	13.21	143.16	0.44	0.48		65	650	14.71	159.40	0.49	0.54
66	660	13.05	143.59	0.43	0.47		66	660	14.53	159.88	0.48	0.52
67	670	12.90	144.02	0.43	0.46		67	670	14.36	160.35	0.47	0.51
68	680	12.74	144.44	0.42	0.44		68	680	14.19	160.82	0.47	0.49
69	690	12.60	144.85	0.42	0.43		69	690	14.02	161.28	0.46	0.48
70	700	12.45	145.26	0.41	0.42		70	700	13.86	161.74	0.46	0.47
71	710	12.31	145.67	0.41	0.41		71	710	13.71	162.19	0.45	0.46
72	720	12.17	146.07	0.40	0.40		72	720	13.55	162.63	0.45	0.45



Anexo 3. Hidrogramas de caudal

Tabla A8. Valores de los Hidrogramas a la salida de la cuenca, con base en los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

No.	Tiempo (min)	Caudal de Salida (m3/s)					
		Hidro-grama 1	Hidro-grama 2	Hidro-grama 3	Hidro-grama 4	Hidro-grama 5	Hidro-grama 6
1	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
8	80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10
9	90	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.20
10	100	0.00	0.00	0.10	0.10	0.20	0.30
11	110	0.00	0.10	0.10	0.20	0.30	0.40
12	120	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
13	130	0.10	0.10	0.20	0.30	0.50	0.60
14	140	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80
15	150	0.10	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
16	160	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	1.20
17	170	0.20	0.30	0.60	0.80	1.10	1.40
18	180	0.20	0.40	0.70	1.00	1.30	1.70
19	190	0.30	0.50	0.90	1.20	1.60	2.10
20	200	0.30	0.60	1.00	1.40	1.90	2.40
21	210	0.40	0.70	1.20	1.70	2.30	2.90
22	220	0.50	0.80	1.50	2.00	2.70	3.40
23	230	0.60	1.00	1.70	2.40	3.10	3.90
24	240	0.70	1.20	2.00	2.80	3.60	4.50
25	250	0.90	1.40	2.40	3.30	4.20	5.20
26	260	1.10	1.70	2.80	3.80	4.90	6.00
27	270	1.30	2.10	3.30	4.40	5.70	7.00
28	280	1.50	2.40	3.90	5.20	6.60	8.00
29	290	1.80	2.90	4.60	6.00	7.60	9.30
30	300	2.20	3.50	5.40	7.10	8.90	10.80
31	310	2.70	4.20	6.50	8.40	10.50	12.60
32	320	3.40	5.10	7.80	10.00	12.50	15.00
33	330	4.30	6.40	9.60	12.30	15.20	18.10
34	340	5.70	8.30	12.30	15.50	19.10	22.70
35	350	8.00	11.60	16.80	21.00	25.60	30.20
36	360	14.70	20.60	28.90	35.60	42.60	49.80
37	370	29.60	40.20	55.00	66.60	78.50	90.70
38	380	47.20	63.10	85.10	102.20	119.60	137.30
39	390	56.10	74.60	100.10	119.80	140.00	160.30

40	400	52.40	69.80	93.90	112.60	131.70	151.10
41	410	49.10	65.90	89.20	107.30	125.90	144.80
42	420	49.40	66.60	90.60	109.30	128.60	148.10
43	430	50.30	68.10	93.00	112.40	132.50	152.80
44	440	54.00	73.30	100.30	121.50	143.20	165.30
45	450	59.80	81.30	111.30	134.80	158.90	183.40
46	460	65.30	88.60	121.10	146.60	172.70	199.10
47	470	66.90	90.70	123.70	149.50	175.90	202.60
48	480	64.70	87.40	118.90	143.50	168.60	193.90
49	490	59.50	80.20	108.70	130.90	153.60	176.40
50	500	52.10	70.00	94.50	113.60	133.00	152.60
51	510	44.60	59.60	80.30	96.30	112.60	129.00
52	520	37.70	50.20	67.40	80.70	94.20	107.80
53	530	31.90	42.30	56.60	67.60	78.70	90.00
54	540	26.90	35.50	47.40	56.50	65.70	75.00
55	550	22.80	30.00	39.90	47.40	55.10	62.80
56	560	19.60	25.70	34.10	40.50	46.90	53.40
57	570	17.10	22.40	29.60	35.10	40.60	46.20
58	580	15.10	19.70	25.90	30.70	35.50	40.30
59	590	13.40	17.50	23.00	27.30	31.50	35.70
60	600	12.30	15.90	20.90	24.80	28.50	32.40
61	610	11.20	14.50	19.00	22.50	25.90	29.40
62	620	10.40	13.40	17.60	20.80	23.90	27.10
63	630	9.70	12.50	16.40	19.40	22.30	25.20
64	640	9.10	11.80	15.40	18.10	20.80	23.60
65	650	8.60	11.10	14.50	17.10	19.60	22.20
66	660	8.10	10.50	13.80	16.20	18.60	21.10
67	670	7.70	10.00	13.10	15.40	17.70	20.00
68	680	7.40	9.60	12.50	14.70	16.90	19.10
69	690	7.10	9.20	12.00	14.20	16.20	18.40
70	700	6.80	8.90	11.60	13.60	15.60	17.70
71	710	6.60	8.50	11.10	13.10	15.00	17.00
72	720	6.40	8.20	10.80	12.60	14.50	16.40